

Vehículo de inspección submarina

Trabajo Final de Grado



Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:

Joan Bauza Roig

Dirigido por:

Juan Antonio Moreno Martínez

Grado en Sistemas y Tecnología Naval

Barcelona, 10 de noviembre de 2015

Departamento de Ciència i Enginyeria Nàutiques



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Facultat de Nàutica de Barcelona

Dedicado a toda la gente que ha contribuido a que este proyecto se llevara a cabo con éxito...



Resumen

Este documento abarca el proceso de diseño y de construcción de un pequeño artefacto submarino dirigido por control remoto con el fin de llevar a cabo inspecciones visuales de elementos subacuáticos, proporcionando registros visuales en tiempo real en superficie y evitando la necesidad de que personal cualificado tenga que acceder a entornos potencialmente peligrosos. El vehículo se realiza con materiales de bajo coste, por lo que presenta las ventajas e inconvenientes que la utilización de estos componentes como alternativa a los vehículos submarinos por control remoto (ROV) profesionales puede presentar.

El documento contiene todas las fases del proceso, desde unos objetivos iniciales hasta las pruebas de mar realizadas al final del proceso de ensamblaje.

Inicialmente se presentan unos requisitos de funcionamiento para poder realizar inspecciones marinas ante un presupuesto limitado. Estos requisitos deben reducirse ante la imposibilidad de cumplir con los objetivos iniciales, teniendo los requisitos iniciales reales determinados y habiendo diseñado todo el sistema del vehículo, la construcción se inicia y eso conlleva a la aparición de nuevos inconvenientes que se irán solucionando durante el proceso de construcción.

Finalmente en la fase de pruebas de mar es donde realmente se pueden comprobar por primera vez los resultados de todos los procesos anteriores y comprobar el correcto comportamiento de los distintos elementos que conforman el vehículo. Se obtiene un análisis de qué tipos de tecnologías de bajo coste pueden ser utilizados en el mundo de los ROVs y cuáles deberían ser descartadas o como mínimo mejoradas para obtener un rendimiento óptimo.

Abstract

This document covers the process of design and construction of a small submarine device commanded by remote control in order to carry out visual inspections of underwater elements providing real-time visual records at surface with the main purpose to prevent the access of qualified personnel into potentially dangerous environments. The vehicle is has been made of low cost materials, besides, I submit the advantages and disadvantages of the use of these components as an alternative to professional remote-controlled underwater vehicles (ROV).

The document contains all of the stages of the process from initial objectives to sea trials produced at the end of the assembly process.

Initially, some performance requirements are presented in order to conduct marine inspections due to the lack of budget these requirements should be reduced considering the impossibility of fulfillment of the original objectives. Having the initial certain requirements determined, and having designed the entire system of the vehicle, the construction is initiated and that leads to the appearance of new problems that will be solved during the construction process.

Finally, in the sea trials stage you really can examine for the first time all of the results of all the processes above and also check the proper behavior of the different elements of the vehicle, obtaining an analysis of which types of low-cost technologies can be used in the world of ROVs and which types should be discarded or at least improved for optimum performance.

Tabla de contenidos

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| CAPÍTULO 2. OBJETIVOS | 3 |
| 2.1. OBJETIVO PRINCIPAL | 3 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 3 |
| 2.2.1. DISEÑO 3D | 3 |
| 2.2.2. PROGRAMACIÓN EN LABVIEW™ | 4 |
| 2.2.3. ELECTRÓNICA | 4 |
| 2.2.4. RED DE COMUNICACIONES..... | 4 |
| 2.2.5. MANIPULACIÓN Y MECANIZADO DE DIFERENTES MATERIALES | 4 |
| 2.2.6. ENSAYOS EN DISTINTOS COMPONENTES | 4 |
| 2.2.7. GESTIÓN DE PROYECTOS..... | 4 |
| CAPÍTULO 3. GESTIÓN DEL PROYECTO..... | 5 |
| 3.1. GUION DEL PROYECTO | 5 |
| 3.2. PLAN DE TRABAJO | 6 |
| CAPÍTULO 4. DISEÑO | 7 |
| 4.1. PROCESO DE DISEÑO | 7 |
| 4.2. DISEÑO CONCEPTUAL | 8 |
| 4.2.1. CICLO A | 8 |
| 4.2.2. 1B REQUISITOS DE RENDIMIENTO | 10 |
| 4.2.3. 2B DISPOSICIÓN | 11 |
| 4.2.5. 3B GEOMETRÍA | 12 |
| 4.2.6. 4B ESTRUCTURA DEL CASCO | 12 |
| 4.2.7. 5B SISTEMA DE PROPULSIÓN | 12 |
| 4.2.8. 6B SISTEMA ELÉCTRICO..... | 13 |
| 4.2.9. 7B SISTEMAS DE CONTROL | 14 |
| 4.2.10. 8-12B OTROS SISTEMAS | 14 |
| 4.3. DISEÑO PRELIMINAR | 15 |
| 4.3.1. REQUISITOS DE RENDIMIENTO | 15 |
| 4.3.2. DISPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS | 16 |
| 4.3.3. GEOMETRÍA | 17 |
| 4.3.4. SISTEMA DE PROPULSIÓN | 18 |
| 4.3.5. SISTEMA ELÉCTRICO..... | 22 |
| 4.3.6. CONTROL Y NAVEGACIÓN | 26 |
| 4.3.7. SISTEMAS AUXILIARES | 33 |
| 4.3.8. EQUIPO | 34 |
| 4.4. DISEÑO FINAL..... | 35 |
| CAPÍTULO 5. CONSTRUCCIÓN | 37 |
| 5.1. LISTADO DE MATERIALES | 37 |

| | |
|---|----|
| 5.2. PRESUPUESTO Y ADQUISICIÓN DE MATERIALES | 38 |
| 5.3. CASCO RESISTENTE | 40 |
| 5.4. ESTRUCTURA | 42 |
| 5.5. PROPULSORES | 44 |
| 5.5.1. PROPULSORES HORIZONTALES..... | 44 |
| 5.5.2. PROPULSORES VERTICALES | 48 |
| 5.6. CONTROL E INSPECCIÓN. | 52 |
| 5.7. LASTRE..... | 58 |
| 5.8. CABLE UMBILICAL | 60 |
| 5.9. SOFTWARE..... | 61 |
| CAPÍTULO 6. PRUEBAS DE MAR..... | 69 |
| CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES | 77 |
| REFERENCIAS | 79 |
| ANEXO A. TEORÍA PARA EL DISEÑO DE SUBMARINOS..... | 81 |
| 7.1. FUERZAS Y MOMENTOS QUE ACTÚAN EN SUMERGIBLES | 81 |
| 7.1.1. FUERZAS ESTÁTICAS..... | 81 |
| 7.1.2. FUERZAS DINÁMICAS..... | 82 |
| 7.1.3. ESTADOS DE EQUILIBRIO | 82 |
| 7.2. CATEGORÍAS HIDROMECÁNICAS DE SUBMARINOS | 83 |
| ANEXO B. TABLAS ADJUNTAS..... | 85 |
| ANEXO C. PLANOS | 86 |

Listado de figuras

| | |
|--|----|
| FIG. 1. ROV PROFESIONAL LLEVANDO A CABO TAREAS DE INSPECCIÓN. (NOAA, 2015)..... | 1 |
| FIG. 2. PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO | 6 |
| FIG. 3. PROCESO DE DISEÑO Y ASOCIADOS (ALLMENDINGER, 1990) | 7 |
| FIG. 4. ESPIRAL DE DISEÑO DE UN SUBMARINO (ALLMENDINGER, 1990) | 8 |
| FIG. 5. DISEÑO CONCEPTUAL FINAL DEL CICLO A | 9 |
| FIG. 6. ESQUEMA ELÉCTRICO BÁSICO | 13 |
| FIG. 7. DISEÑO CONCEPTUAL AL FINAL DEL CICLO B (MARTÍNEZ, 2015) | 15 |
| FIG. 8. CIRCUNFERENCIA ESLORA-EJE DE LOS PROPULSORES..... | 18 |
| FIG. 9. DISEÑO ANILLAS SOPORTE. | 19 |
| FIG. 10. POSICIÓN DE LOS PROPULSORES HORIZONTALES | 20 |
| FIG. 11. VISTA 3D DE LA CHUMACERA DE APOYO | 21 |
| FIG. 12. CONO DE CIERRE DEL EJE | 21 |
| FIG. 13. FUENTE DE ALIMENTACIÓN SELECCIONADA. (PC COMPUTER DEALS, 2015) | 23 |
| FIG. 14. CHIPKIT WF32 (DIGILENT, 2015) | 26 |
| FIG. 15. CIRCUITO ELECTRÓNICO PARA EL SENSOR DE INUNDACIÓN..... | 27 |
| FIG. 16. SENSOR DE PRESIÓN MPX5050 (OCTOPART, 2015)..... | 28 |
| FIG. 17. SENSOR DE CORRIENTE ACS712 (ARDUINO, 2015)..... | 29 |
| FIG. 18. SENSOR MAGNÉTICO HMC5883L (HONEYWELL, 2015) | 29 |
| FIG. 19. MPU-6050..... | 30 |
| FIG. 20. SENSOR TMP35 (DIGCHIP, 2015) | 30 |
| FIG. 21. CONTROLADOR LM298N (TRONIXLABS, 2015)..... | 31 |
| FIG. 22. CONTROLADOR BTS7960B (ROBOTUS, 2015)..... | 31 |
| FIG. 23. LOGO DE LABVIEW™ (NATIONAL INSTRUMENTS, 2015) | 32 |
| FIG. 24. CÁMARA IP SRCAM AP003..... | 33 |
| FIG. 25. FOCOS LED SUMERGIBLES..... | 34 |
| FIG. 26. PRUEBA DE INUNDACIÓN DEL CASCO RESISTENTE..... | 40 |
| FIG. 27. DISEÑO DE LA ANILLA A IMPRIMIR EN 3D. | 41 |
| FIG. 28. FIJACIÓN DE LA SECCIÓN DE PROA DEL CASCO RESISTENTE | 41 |
| FIG. 29. MARCADO DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES..... | 42 |
| FIG. 30. CORTE DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES. | 42 |
| FIG. 31. ADHESIÓN DE LAS ANILLAS PARA AUMENTAR ESPESOR Y RESISTENCIA. | 43 |
| FIG. 32. ADHESIÓN DE LA ESTRUCTURA AL CASCO RESISTENTE. | 43 |
| FIG. 33. PRESENTACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LOS PROPULSORES HORIZONTALES. | 44 |
| FIG. 34. MANGUITOS DE LA SECCIÓN DE PROA Y SU ADAPTACIÓN..... | 44 |
| FIG. 35. TALLADO DE LAS TOBERAS | 45 |
| FIG. 36. MOTOR, EJE, BOCINA Y HÉLICE. | 45 |
| FIG. 37. AJUSTE DEL RELLENO DE LASTRE..... | 46 |
| FIG. 38. ANILLA DE SUJECIÓN IMPRESA EN 3D..... | 46 |
| FIG. 39. VISTA DE UN PROPULSOR HORIZONTAL Y OTROS COMPONENTES IMPRESOS EN 3D. | 47 |
| FIG. 40. SISTEMA DE FIJACIÓN DE LOS PROPULSORES HORIZONTALES A LA ESTRUCTURA. | 47 |
| FIG. 41. VISTA DEL PASAHILOS INSTALADO Y CON EL CABLE DE ALIMENTACIÓN. | 48 |
| FIG. 42. SECCIÓN INFERIOR DE UN PROPULSOR VERTICAL..... | 48 |
| FIG. 43. ELEMENTOS MECÁNICOS. | 49 |
| FIG. 44. CHUMACERAS DE APOYO INTERIORES..... | 49 |

| | |
|---|----|
| FIG. 45. SOLDADURA DE LAS CONEXIONES ELÉCTRICAS AL MOTOR DC. | 49 |
| FIG. 46. LASTRE MEDIDO PARA CADA UNO DE LOS PROPULSORES..... | 50 |
| FIG. 47. HÉLICE EN PROCESO DE REMODELACIÓN. | 50 |
| FIG. 48. SOPORTES DE FIJACIÓN DE LOS PROPULSORES VERTICALES. | 51 |
| FIG. 49. PRUEBA DE UN PROPULSOR VERTICAL. | 51 |
| FIG. 50. COMPROBACIÓN DEL CORRECTO FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN. | 52 |
| FIG. 51. VISTA GENERAL DEL SISTEMA DE ILUMINACIÓN INSTALADO Y LA POSICIÓN DE LA PLATAFORMA INTERIOR. | 52 |
| FIG. 52. PLATAFORMA PARA LA ELECTRÓNICA CON EL MECANIZADO PARA SUJETAR LA VIDEOCÁMARA..... | 53 |
| FIG. 53. CARRILES DE FIJACIÓN DE LA PLATAFORMA, INTERIOR DEL CASCO RESISTENTE. | 53 |
| FIG. 54. VIDEOCÁMARA EN EL INTERIOR DEL CASCO RESISTENTE. | 54 |
| FIG. 55. CONFIGURACIÓN DE LOS REGULADORES DE TENSIÓN. | 55 |
| FIG. 56. FIJACIÓN DE VARIOS COMPONENTES ELECTRÓNICOS. | 55 |
| FIG. 57. CABLEADO DE POTENCIA A TODOS LOS COMPONENTES. | 56 |
| FIG. 58. BARRAS DE ALIMENTACIÓN. | 56 |
| FIG. 59. CABLEADO EXTERIOR EN LA PARTE INFERIOR DEL VEHÍCULO..... | 57 |
| FIG. 60. VISTA FINAL A FALTA DEL LASTRE. | 57 |
| FIG. 61. CORTE DE LA PIEZA DE LASTRE..... | 59 |
| FIG. 62. APLICACIÓN DE PROTECCIÓN AL LASTRE. | 59 |
| FIG. 63. LASTRE..... | 60 |
| FIG. 64. CABLE UMBILICAL..... | 60 |
| FIG. 65. VISTA FINAL DEL PANEL FRONTAL DEL PROGRAMA DE CONTROL. | 61 |
| FIG. 66. VISTA LEJANA DEL DIAGRAMA DE BLOQUE COMPLETO. | 62 |
| FIG. 67. LECTURA DE LOS REGISTROS DEL JOYSTICK. | 63 |
| FIG. 68. OBTENCIÓN DE DATOS DE LOS SENSORES ANALÓGICOS. | 63 |
| FIG. 69. LECTURAS DE LOS REGISTROS DE LOS SENSORES DIGITALES MEDIANTE PROTOCOLO I2C. | 64 |
| FIG. 70. CONVERSIÓN DE VOLTAJE EN PROFUNDIDAD (SENSOR DE PROFUNDIDAD)..... | 64 |
| FIG. 71. CONVERSIÓN DE VOLTAJE EN AMPERIOS (SENSORES DE CORRIENTE). | 65 |
| FIG. 72. CONVERSIÓN DE DATOS DEL ACCELERÓMETRO EN ESCORA Y CABECEO. | 65 |
| FIG. 73. CONVERSIÓN DE DATOS DEL MAGNETÓMETRO EN RUMBO..... | 65 |
| FIG. 74. ORDENES LÓGICAS A CANALES DIGITALES. | 66 |
| FIG. 75. SISTEMA DE CONTROL DE ESTABILIDAD. | 66 |
| FIG. 76. SISTEMA DE CONTROL DE PROFUNDIDAD..... | 67 |
| FIG. 77. CAPTURA DEL PROGRAMA DE VISUALIZACIÓN DE LA VIDEOCÁMARA. | 67 |
| FIG. 78. VEHÍCULO PREPARADO PARA LA INMERSIÓN MIENTRAS SE LLENA LA PISCINA. | 69 |
| FIG. 79. CAPTURA DEL PANEL DE CONTROL CON EL SENSOR DE INUNDACIÓN DISPARADO..... | 70 |
| FIG. 80. SUMERGIBLE DURANTE LAS PRUEBAS DE NAVEGACIÓN. | 71 |
| FIG. 81. SUMERGIBLE CON LASTRE AJUSTADO..... | 72 |
| FIG. 82. DEFECTOS EN SOLDADURA OBSERVADOS A TRAVÉS DEL ROV EN EL AGUA. | 73 |
| FIG. 83. CORDÓN DE SOLDADURA. | 73 |
| FIG. 84. SOLDADURA OBSERVADA. | 74 |
| FIG. 85. GRIETAS..... | 74 |
| FIG. 86. CAPTURA DEL VEHÍCULO SUBMARINO..... | 75 |
| FIG. 87. CAPTURA CON UNA CÁMARA SUBMARINA DE ALTA CALIDAD. | 75 |
| FIG. 88. VEHÍCULO SUBMARINO DURANTE LAS PRUEBAS DE INSPECCIÓN. | 76 |
| FIG. 89. PLANO VISTA DE PLANTA..... | 87 |
| FIG. 90. PLANO DE VISTA FRONTAL..... | 88 |

Listado de tablas

| | |
|--|----|
| TABLA 1. REQUISITOS DE LA FASE CONCEPTUAL..... | 9 |
| TABLA 2. REQUISITOS DE RENDIMIENTO 1B | 10 |
| TABLA 3. DISPOSICIÓN 2B..... | 11 |
| TABLA 4. GEOMETRÍA 3B..... | 12 |
| TABLA 5. CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTO..... | 17 |
| TABLA 6. COMPONENTES DE UN PROPULSOR HORIZONTAL..... | 19 |
| TABLA 7. COMPONENTES DE UN PROPULSOR VERTICAL..... | 21 |
| TABLA 8. BALANCE ENERGÉTICO. | 22 |
| TABLA 9. CAÍDAS DE TENSIÓN SEGÚN LONGITUD DEL CABLE Y CONSUMO..... | 24 |
| TABLA 10. CARACTERÍSTICAS DE CAÍDA DE TENSIÓN PARA 13M DE CABLE. | 24 |
| TABLA 11. REGULADORES DE TENSIÓN Y COMPONENTES | 25 |
| TABLA 12. LISTADO DE MATERIALES | 38 |
| TABLA 13. PRESUPUESTO Y ADQUISICIONES | 40 |
| TABLA 14. CÁLCULO DEL LASTRE NECESARIO. | 58 |
| TABLA 15. DIÁMETROS DE CABLE SEGÚN DISTANCIA E INTENSIDAD, 12V. (FIRSTFLEX, 2012)..... | 85 |

Listado de ecuaciones

| | |
|--|----|
| ECUACIÓN 1. CÁLCULO DE DESPLAZAMIENTO..... | 12 |
| ECUACIÓN 2. CALCULO DE LA CAÍDA DE TENSIÓN | 23 |
| ECUACIÓN 3. DESPLAZAMIENTO | 81 |

Capítulo 1. Introducción

Desde tiempos lejanos la exploración de los mares y de sus profundidades ha supuesto un gran desafío para el ser humano. Hoy en día, los fondos marinos siguen siendo un gran interrogante para los seres humanos. A pesar de que se hacen esfuerzos para avanzar en la exploración de este tipo de ambientes, resulta muy complicado debido a la hostilidad del medio. Crear artefactos preparados para resistir a las fuertes presiones a las que son sometidos en el agua siempre conlleva un gran desafío de ingeniería, y así es como se decidió llevar a cabo este proyecto, como un desafío. Ya resultaba un desafío crear desde cero un artefacto submarino, a lo que se añadió la dificultad de que se utilizarían materiales de bajo coste.

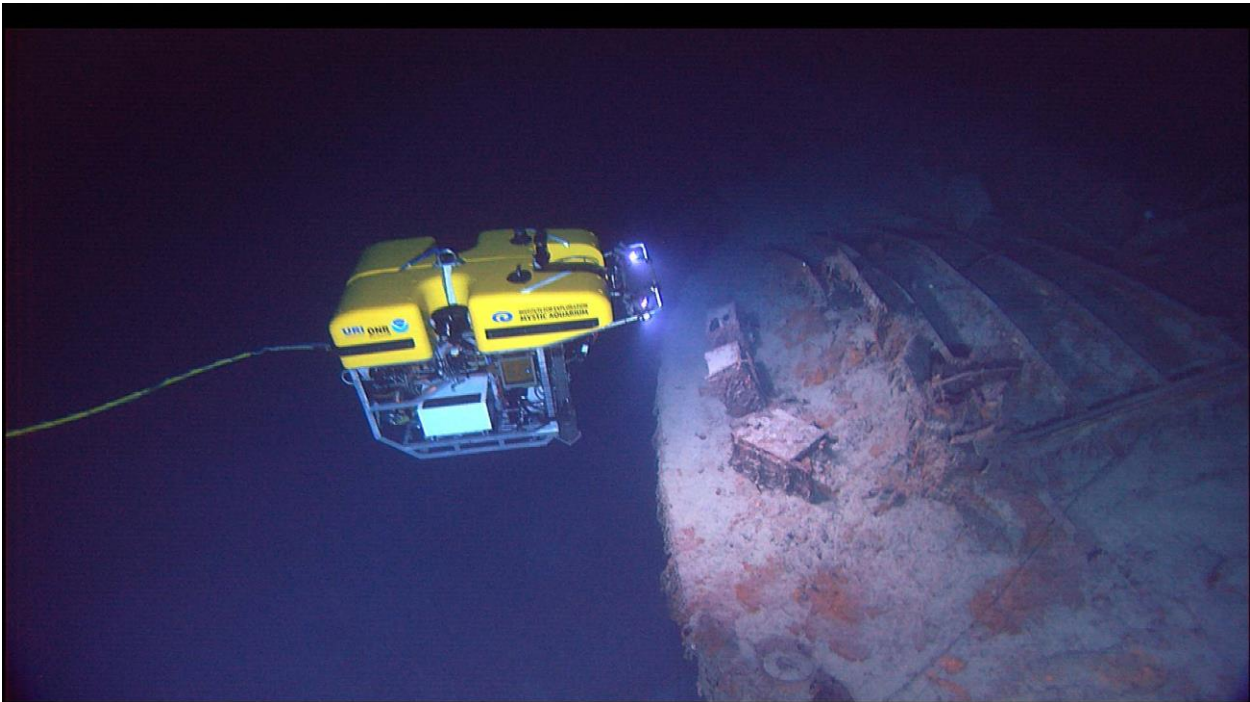


Fig. 1. ROV profesional llevando a cabo tareas de inspección. (NOAA, 2015)

El punto de salida del proyecto lo marca un objetivo: inspeccionar elementos subacuáticos evitando la intervención de buceadores en entornos potencialmente peligrosos. Partiendo de este punto, se debe desarrollar todo el contenido alrededor de ese objetivo inicial con el fin de cumplirlo lo más satisfactoriamente posible, teniendo en cuenta la parte experimental del proyecto.

El fin primero de utilizar materiales de bajo coste forma parte de un intento de analizar el comportamiento de estos componentes en un entorno hostil, pudiéndose quizás aplicar alguno de ellos en el mundo de los vehículos submarinos controlados por control remoto profesionales. Puesto que estos submarinos son elementos extremadamente caros, la intención de incorporar elementos de bajo coste es la de reducir el

precio de estos pudiendo así convertirlos en más accesibles. En caso de que durante el desarrollo del proyecto se encontraran elementos que pudieran ser utilizados como tecnologías para usos profesionales se deberían realizar pruebas sobre el comportamiento de resistencia y fiabilidad de los mismos.

Para llevar a cabo este proyecto se consultan dos tipos de documentación. La primera parte es documentación relacionada con el diseño de vehículos submarino o ROVs, como libros especializados. En cambio, el segundo tipo de documentación es mucho más técnica: son las hojas de datos de los componentes que forman partes de los diferentes sistemas del sumergible, datos que son necesarios para garantizar que los componentes cumplan las características necesarias y por otra parte para entender su funcionamiento e interconectarlos con los demás sistemas del vehículo.

La duración total del proyecto es de diez meses y en el apartado de planificación se puede obtener una cronología detallada de sus diferentes fases y de la duración de las mismas. Una vez finalizado el proyecto se puede seguir trabajando en el vehículo para realizarle mejoras o someterlo a pruebas más complejas.

Capítulo 2. Objetivos

En esta sección se explicarán los objetivos propuestos al inicio del proyecto. Así, durante la lectura y análisis de este trabajo final de grado, se podrá comprobar cómo se desarrollan y se trabaja con el fin de una vez concluido el proyecto poder garantizar que estos han sido alcanzados.

2.1. Objetivo principal

El objetivo principal de este proyecto consiste en proporcionar una plataforma de inspección visual submarina. Esto comprende el diseño integral y la construcción de un pequeño vehículo submarino que, armado con los sistemas necesarios, otorgue la posibilidad (a personal técnico) de obtener registros visuales del estado de estructuras sumergidas en tiempo real. Con ello se pretende evitar la actuación directa de recursos humanos (buzos) en entornos comprometidos, evitando así los riesgos que esto conlleva. El vehículo submarino debe cumplir todos los requisitos de navegabilidad para poder desarrollar satisfactoriamente su misión principal, que consiste en la inspección del elemento objetivo.

A continuación se incluye una lista con ejemplos de los posibles objetivos a inspeccionar por el vehículo submarino:

- Uniones soldadas
- Superficie de la obra viva (patente, gelcoats, incrustaciones, corrosión, impactos, fisuras, etc.)
- Elementos específicos (ejes de cola, hélices, timones, tomas de mar, ánodos de sacrificio, etc.)
- Estructuras marinas (pantalanes, aerogeneradores marinos, etc.)
- Cables y tuberías submarinas

2.2. Objetivos específicos

Una vez especificado el objetivo principal de este proyecto se pueden detallar una lista de objetivos específicos o secundarios que no contienen el fin de este proyecto pero que sí son necesarios para llegar a este.

2.2.1. Diseño 3D

Para la realización de este proyecto se utilizarán programas de diseño en 3D (CAD) para definir las formas y poder hacer de manera más sencilla cálculos de volúmenes y pesos. También se contará con un sistema de impresión en 3D para poder materializar muchas de las piezas diseñadas virtualmente.

2.2.2.Programación en Labview™

Labview™ (National Instruments, 2015) es un entorno de programación gráfica desarrollado por la compañía National Instruments (NI, 2015) que se usará para implementar el sistema de control e inspección del vehículo submarino. En posteriores secciones de este documento se analizará más detenidamente este software.

2.2.3.Electrónica

Para la implementación de todos los circuitos de control del vehículo submarino deberán llevarse a cabo diseños de circuitos tanto electrónicos como eléctricos.

2.2.4.Red de comunicaciones

El sistema de transmisión de datos en tiempo real del vehículo submarino requerirá un sistema de comunicación que permita un flujo constante de datos entre el operador y el vehículo. Para cumplir tal objetivo se requerirán conocimientos en telecomunicaciones.

2.2.5.Manipulación y mecanizado de diferentes materiales

La sección del proyecto en la que se montará el vehículo siguiendo el diseño realizado en la fase anterior requerirá de conocimientos con el uso de herramientas de taller y la habilidad para la manipulación y mecanizado de los materiales.

2.2.6.Ensayos en distintos componentes

Teniendo en cuenta que no se encuentra mucha información referente a la construcción de este tipo de vehículos, en la fase previa a la construcción será necesario, hacer ensayos de funcionamiento sobre los diferentes componentes con el fin de garantizar que cumplirán su cometido una vez instalados en el vehículo.

2.2.7.Gestión de proyectos

Al ser este un proyecto multidisciplinar se deberá tener una cuidadosa planificación para cumplir con los términos establecidos, como se detalla más profundamente en el siguiente capítulo.

Capítulo 3. Gestión del proyecto

3.1. Guion del proyecto

Este proyecto se divide en dos apartados principales: la fase de diseño y la fase de construcción del vehículo submarino. Basado en ellos, se ha elaborado un guion de las fases con las que cuenta el proyecto.

1. Diseño

- a. Profundidad de operación
- b. Radio de alcance
- c. Capacidades de gobierno
 - i. Propulsión
 - ii. Dirección
 - iii. Inmersión
 - iv. Comunicaciones
- d. Estanqueidad
 - i. Casco resistente
 - ii. Prevención de inundación
 - iii. Sistemas de detección de inundación
- e. Sistema energético
 - i. Alimentación eléctrica
 - ii. Prevención de la caída de planta
 - iii. Sistema de gestión de la energía
- f. Hardware para el control de los sistemas
 - i. Microcontrolador
 - ii. Sensores
 - iii. Actuadores
- g. Hardware para llevar a cabo la inspección
 - i. Captura de imagen
 - 1. Videocámara
 - 2. Iluminación
 - ii. Profundidad de inmersión
 - iii. Hardware para el control de los sistemas de inspección
 - 1. Red de comunicaciones
 - 2. Suministro energético

2. Construcción

- a. Documentación gráfica de la fase de diseño (Diseño 3D y sistemas)
 - b. Listado de materiales
 - c. Petición de oferta a proveedores.
 - d. Compra de materiales
 - e. Pruebas de materiales para garantizar objetivos de diseño
 - f. Montaje
 - g. Adaptaciones de diseño sujetas a posibles variaciones de los materiales o elementos
3. **Programación de Software**
 - a. Labview™ (National Instruments, 2015)
 - b. Configuración de la red de comunicaciones
 - c. Posible software complementario
 4. **Pruebas de mar**
 - a. Navegabilidad
 - b. Inmersión
 - c. Inspección visual y adquisición de datos
 5. **Redacción de la memoria técnica**
 6. **Defensa del TFG delante de tribunal**

3.2. Plan de trabajo

A continuación se ha elaborado un plan de trabajo para poder garantizar el cumplimiento del plazo propuesto para la elaboración del proyecto y tener mayor organización de este.

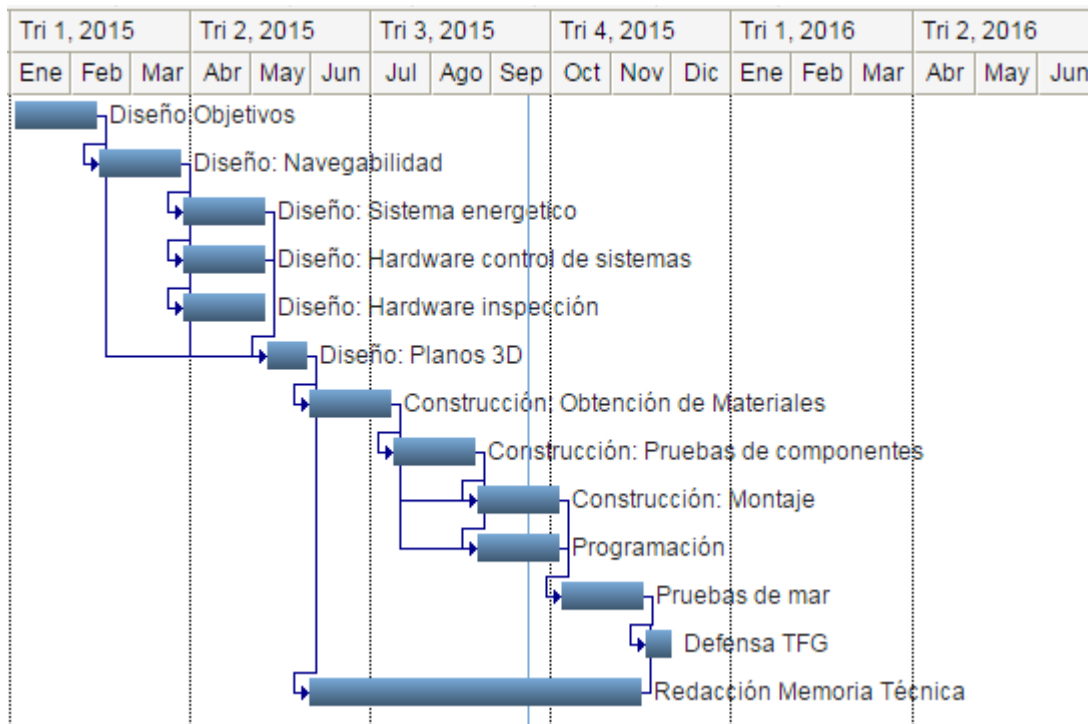


Fig. 2. Planificación del proyecto

Capítulo 4. Diseño

4.1. Proceso de diseño

Siguiendo el Capítulo 1 del libro *Submersible Vehicle Systems Design* (Allmendinger, 1990), en el que se expone cómo deberá ser el proceso de diseño de un vehículo submarino, a partir de esta información se determina cómo deberá ser el proceso de diseño para conseguir unos resultados óptimos.

Como se puede ver en la Fig. 3, la fase de diseño cuenta con un apartado anterior y uno posterior. En el caso de este proyecto la fase de Pre-diseño está vinculada con el «Capítulo 2. Objetivos» de este documento, donde se describe el fin para el que se lleva a cabo este proyecto y los requerimientos de este.

La fase de post-diseño incluiría varias secciones, como el capítulo de construcción o las pruebas de mar.

El apartado de diseño se inicia una vez finalizada la sección de pre-diseño, siempre pudiendo volver atrás en caso de que hubiera cambios en los objetivos iniciales. Esta sección consta de cuatro apartados, cada uno más complejo a medida que se va bajando a través de ellos.

La Fig. 4 explica la técnica de cómo se desarrolla un proceso de diseño en espiral. Cada vuelta al espiral corresponde aproximadamente a una de las casillas de la fase de diseño de la Fig. 3, por tanto una vez alcanzado el centro del espiral se obtiene el diseño en detalle y se finaliza así la fase de diseño.

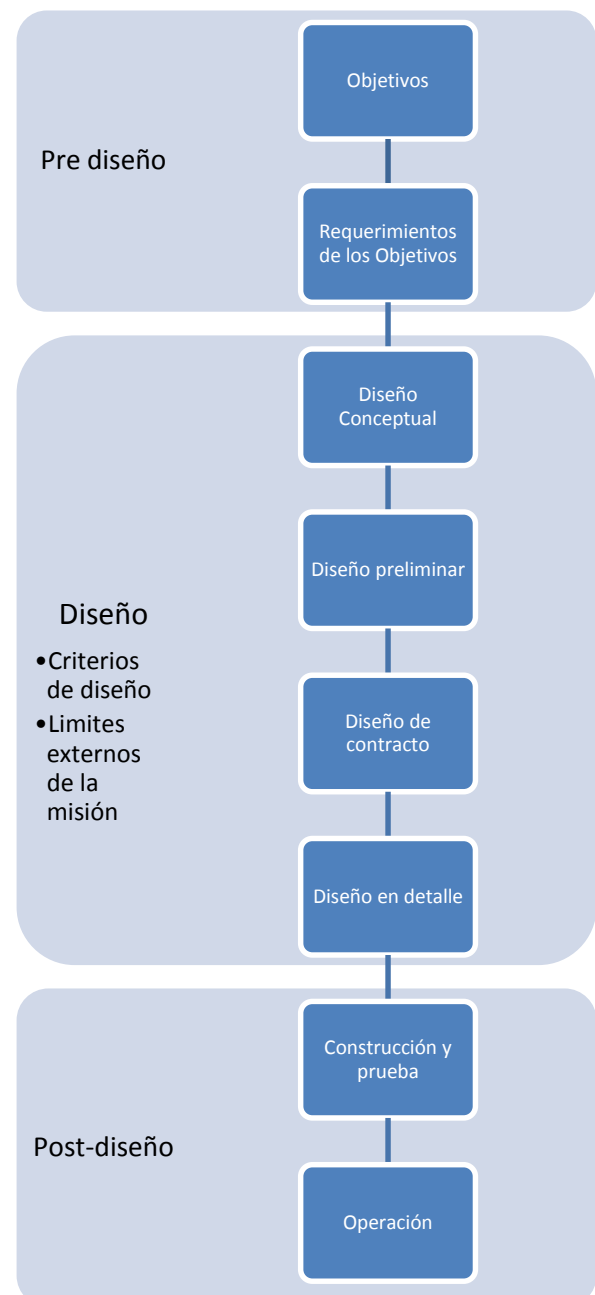


Fig. 3. Proceso de diseño y asociados (Allmendinger,

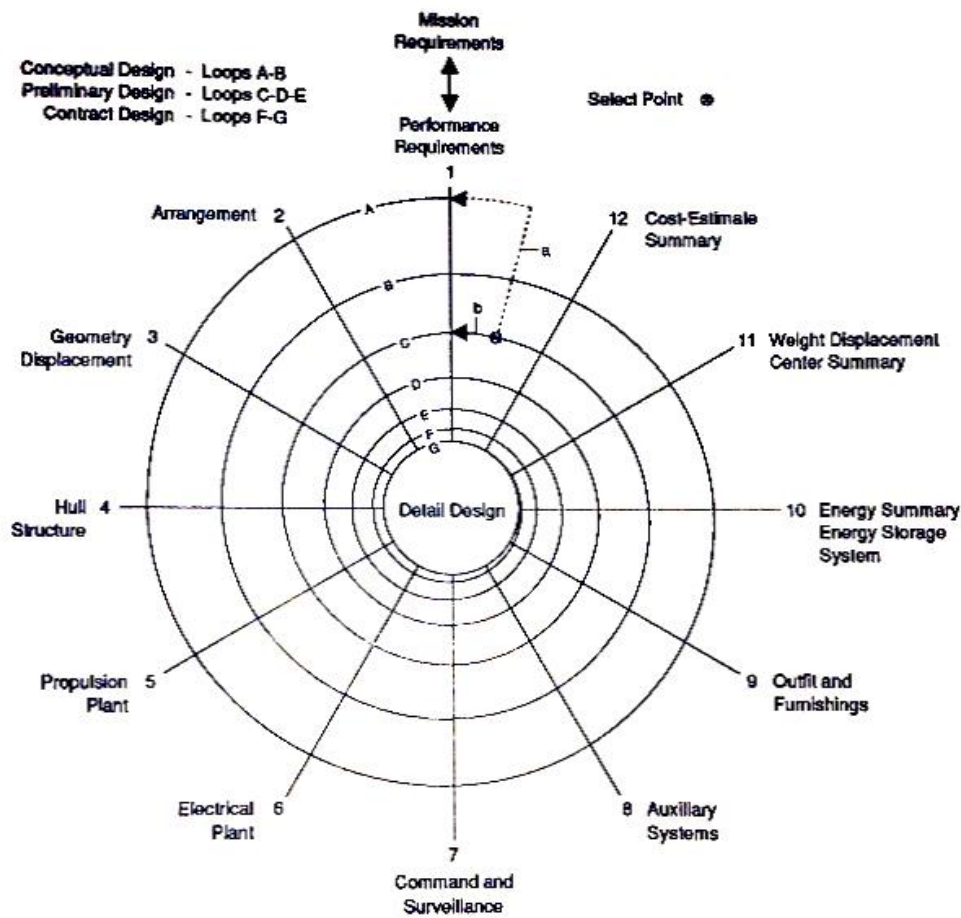


Fig. 4. Espiral de diseño de un submarino (Allmendinger, 1990)

4.2.Diseño conceptual

Es la primera fase del diseño una vez definidos los objetivos del proyecto y los requerimientos para estos. En esta fase se definen los siguientes elementos según Allmendinger (1990):

1. Desarrollar los requisitos de rendimiento o las capacidades del sistema
2. Determinar las principales características de los sistemas requeridos
3. Estimación de costes
4. Considerar uno o varios sistemas entre los que cumplan los requisitos para las posibles limitaciones de diseño.

4.2.1.Ciclo A

Dentro de las diferentes categorías en las que se puede catalogar un vehículo submarino, el mencionado en este documento se clasificaría para uso Comercial/Industrial en la subcategoría de inspección. Esto marcaría el punto de partida para determinar los requisitos de rendimiento. En la Tabla 1 se hace una recopilación de los requisitos de rendimiento iniciales propuestos para la fase de diseño conceptual.

| Requisito | Objetivo |
|-----------------------|---|
| Profundidad/inmersión | Debe poder realizar inmersiones a la profundidad necesaria para inspeccionar cascos de buques ≈15m |
| Radio de alcance | Radio suficiente para poder recorrer la eslora de un buque mediano≈50m |
| Propulsión | Capacidad de poderse desplazar en el plano horizontal |
| Dirección | Posibilidad de cambiar el rumbo |
| Comunicaciones | Capacidad de recibir órdenes de navegación y realizar inspecciones en tiempo real. |
| Estanqueidad | El casco resistente debe aguantar la presión y no tener ninguna fuga. Sistemas de aviso de inundación |
| Energía | El vehículo debe tener suministro energético propio o recibirlo del exterior |
| Hardware | Debe contar con los sistemas necesarios para controlar los componentes de navegación y de inspección. |
| Bajo Coste | El presupuesto para materiales debe ser lo más ajustado posible, dentro de unos límites. ≈1000 € |

Tabla 1. Requisitos de la fase conceptual

La estimación de costes queda derivada al apartado 5.2 de presupuesto, ya que, en este nivel, sin haberse realizado un estudio de mercado de los componentes, es difícil poder hacer una estimación de los costes. De todas formas, teniendo en cuenta el presupuesto con el que se cuenta, en las siguientes fases del diseño se pondrán límites y puede que algunos de los requisitos planteados en esta fase cambien en la siguiente vuelta del espiral, siendo el presupuesto un requisito inalterable.

En la fase de diseño conceptual, según Allmendinger (1990), deben listarse los sistemas con los que deberá contar el sumergible. Para encontrar tal lista se hace referencia a la sección de Diseño del Guion del Proyecto. En las siguientes fases del diseño se ampliará y definirá la información referente a cada uno de estos sistemas.

En la Fig. 5 se presenta una primera idea conceptual de cómo podría ser el vehículo submarino. En las próximas fases del proceso de diseño se modificará este esbozo teniendo en cuenta las limitaciones y las opciones de sistemas instalados.

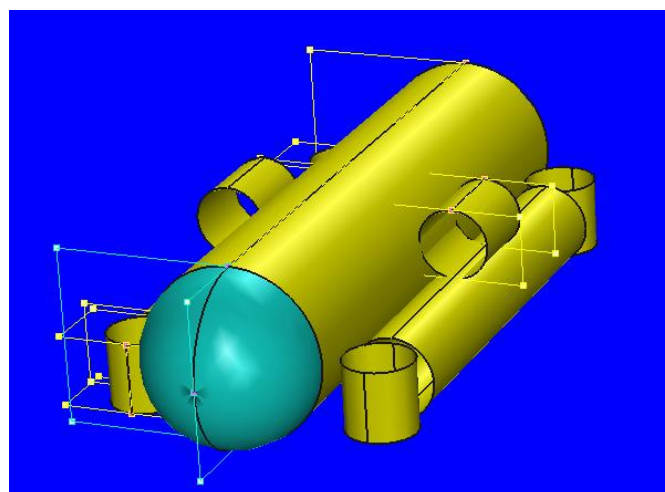


Fig. 5. Diseño Conceptual Final del ciclo A

Una vez finalizada la primera vuelta al espiral de diseño (Fig. 4), nos adentramos en la segunda (B). Seguiremos en el diseño conceptual, pero nos introduciremos más en la definición de cada uno de los sistemas, para así llegar a la fase de diseño preliminar con unos sistemas ya definidos a grandes rasgos. A partir de este punto de la fase de diseño, se seguirá el orden del espiral en la definición de los diferentes sistemas del vehículo submarino. Los caracteres incluidos en el título de cada apartado indican el ciclo del espiral en la que nos encontramos y el dígito indica el apartado en sí.

4.2.2.1B Requisitos de rendimiento

A continuación se muestra una tabla con los datos del apartado 1B. Requisitos de rendimiento del espiral de diseño.

| Requisito | Datos |
|------------------------------|--|
| Profundidad | Se reduce la profundidad de servicio debido a la imposibilidad de garantizar que los componentes posibles a utilizar siguiendo el presupuesto marcado resistan a más de 10m de profundidad |
| Rango | ≈50m |
| Velocidad | La velocidad de desplazamiento no es un factor crucial en esta fase de diseño al tratarse de un sumergible de pequeñas dimensiones con un rango de operación limitado. |
| Maniobra | Existen dos posibles soluciones al sistema de maniobra: <ol style="list-style-type: none"> 1. Sistema de lastre variable: este sistema necesita un suministro y control de aire comprimido. 2. Sistema de propulsores verticales: este sistema funciona con el suministro eléctrico ya necesario en el vehículo, por tanto solo implicaría un sobredimensionado del sistema eléctrico, sin incorporar ningún sistema nuevo. Con las características aportadas se cree conveniente utilizar el segundo sistema. |
| Peso | Se deben conocer los pesos de todos los elementos tanto externos como internos al casco de presión. En las siguientes fases se irá confeccionando una lista del peso de los componentes. Posiblemente el peso de muchos de ellos no podrá determinarse hasta que se hayan adquirido. |
| Sistema de inspección | Se deberá instalar una videocámara en el interior del vehículo con un material transparente para el correcto visionado del exterior y un sistema de iluminación que debe ir en el exterior para así evitar posibles reflejos en el material transparente que puedan afectar a la videocámara. |
| Medidas de seguridad | En esta fase inicial del diseño las medidas de seguridad propuestas son las siguientes: <ul style="list-style-type: none"> • Alarma de inundación • Control de temperatura de los componentes susceptibles a calentarse • Protección de las distintas secciones del sistema eléctrico |
| Estados de la mar limitantes | Este submarino se diseña para misiones en interiores de puertos y zonas resguardadas. Por tanto, todas las condiciones de mar que difieran de las citadas anteriormente limitan el uso de este vehículo. |

Tabla 2. Requisitos de rendimiento 1B

4.2.3.2B Disposición

En este apartado se trata todo lo referente al casco, al recubrimiento de este y a la colocación de los elementos.

| Requisito | Datos |
|---------------------------------|---|
| Casco de presión | El casco de presión será de presión constante. El vehículo constará de un casco de presión cilíndrico responsable de alojar todos los componentes electrónicos. |
| Recubrimiento | Inicialmente no se contempla que el vehículo submarino conste de recubrimiento, solo contará con sistemas estructurales abiertos con el fin de sujetar todos los componentes necesarios en el exterior del casco de presión. |
| Localización de otros elementos | <ol style="list-style-type: none"> 1. En el interior del casco de presión <ol style="list-style-type: none"> a. Sistemas de control del sumergible b. Sistemas de comunicaciones c. Sistemas de inspección, excepto los mencionados anteriormente (iluminación). 2. En el exterior del casco de presión <ol style="list-style-type: none"> a. Propulsores b. Iluminación c. Otros sistemas d. El cableado procedente de todos los elementos que se encuentren en el exterior y necesiten suministro energético deberá atravesar el casco de presión, con sus correspondientes sellos estancos. |

Tabla 3. Disposición 2B

4.2.5.3B Geometría

En este apartado se presentan las primeras formas posibles y se definen una serie de características nuevas.

| Requisito | Datos |
|----------------------|---|
| Casco de presión | El diseño del casco de presión se plantea para poca profundidad, por lo que puede tener un diseño cilíndrico con el acabado frontal en una semiesfera cristalina y el posterior con una compuerta para poder acceder a los componentes electrónicos alojados en el interior. La eslora del conjunto se estima en $\approx 400\text{mm}$ y la manga queda por determinar dependiendo del tamaño de los componentes a alojar. |
| Estructuras externas | Se incluirán dos soportes transversales para la sujeción de los propulsores y del equipamiento que pueda necesitar ir en el exterior. |
| Desplazamiento | <p>En un primer cálculo del desplazamiento, en el que estimamos una eslora de 400 mm con un cilindro de 200 mm de diámetro y una semiesfera en la sección de proa.</p> $\Delta = \rho \cdot \left((\pi \cdot r^2 \cdot l) + \left(\frac{2}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \right) \right) = 11,8 \text{ Kg}$ <p>Ecuación 1. Cálculo de desplazamiento</p> <p>Δ es desplazamiento.</p> <p>r es radio del cilindro y la semiesfera.</p> <p>l es longitud del cilindro</p> <p>ρ es la densidad del fluido en el que se calcula el desplazamiento (agua de mar).</p> |

Tabla 4. Geometría 3B

4.2.6.4B Estructura del casco

Como ya se ha definido en los anteriores apartados, el casco de presión constará de un cilindro y una semiesfera en proa. A este se le añadirán dos soportes transversales para sujetar los propulsores horizontales y en cada lado llevarán un propulsor vertical acoplado, como puede verse en el diseño de la Fig. 7. En el interior del casco de presión y también en el de los distintos propulsores se colocará lastre.

4.2.7.5B Sistema de propulsión

El vehículo submarino constará de 6 propulsores, 2 encargados de la propulsión en el plano horizontal y 4 destinados a la inmersión y estabilidad del vehículo, siguiendo el esquema que se puede observar en la Fig. 7. El sumergible realizará todas las maniobras y movimientos mediante estos propulsores; será un vehículo únicamente con control dinámico, sin contar con sistemas de lastre variable (estático) o timones para corregir el rumbo. Todos los motores DC eléctricos incorporados en los propulsores llevarán un controlador con el fin de poder regular la velocidad y la dirección de rotación de cada uno independientemente. La gran mayoría de la potencia eléctrica se dedicará a alimentar a estos 6 propulsores. Los 6 propulsores contarán con hélice de 3 palas en una tobera para protegerlas de posibles impactos u objetos.

4.2.8.6B Sistema eléctrico

El suministro eléctrico a bordo se realizará mediante un cable umbilical debido a la obligación de poner un cable para comunicaciones, aspecto que será tratado en apartados próximos. Así no se requieren baterías ni sistemas de carga para estas. En la Fig. 6 se puede apreciar un sencillo esquema de cómo se propone el circuito eléctrico básico, que se desarrollará en las siguientes fases de diseño. Mediante este esquema se puede empezar a trabajar en el desarrollo y diseño de un sistema eléctrico completo.

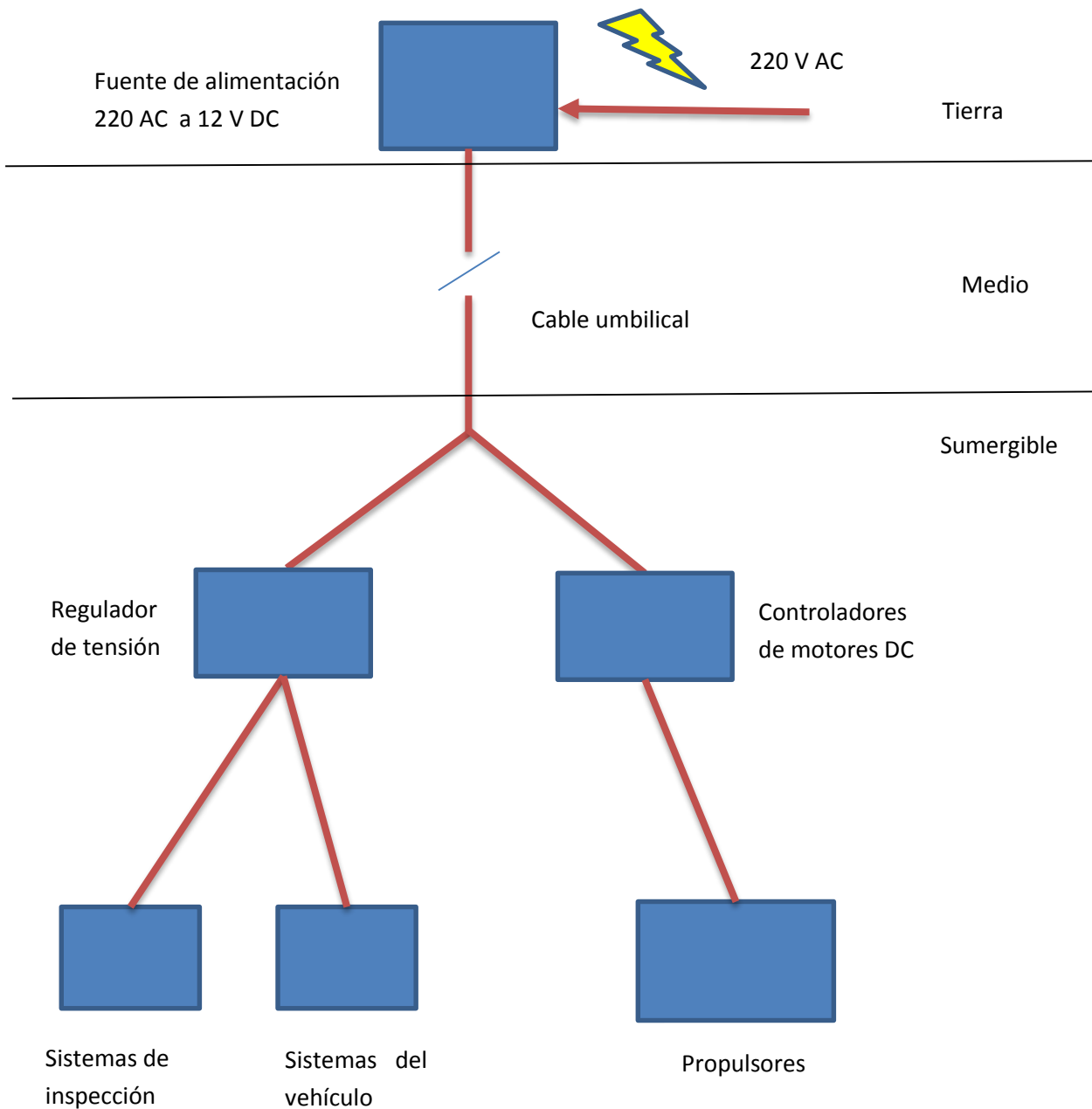


Fig. 6. Esquema eléctrico básico

4.2.9.7B Sistemas de control

El diseño del sistema de control se basará en un microcontrolador instalado en el interior del vehículo que incorporará todos los sensores (compas, acelerómetros, barómetros, etc.) y actuadores (relés, controles de motores, etc.). El microcontrolador se conecta a un PC en superficie mediante el cable umbilical con el que cuenta el vehículo. El PC será el encargado de alojar el programa de control, hacer los cálculos oportunos y transmitir la información necesaria al microcontrolador. En el PC el operador dispondrá de toda la información de navegación, así como los registros visuales obtenidos para la inspección. Al PC se conectará algún elemento tipo “gamepad” para facilitar el manejo del vehículo.

Para llevar a cabo este sistema se necesita una vía de comunicación de alta velocidad. Analizando los sistemas de comunicación inalámbricos que existen en medios acuáticos, que consisten en sistemas de comunicación acústicos principalmente, se determinó que resultaría extremadamente complicado conseguir un flujo de datos lo suficientemente rápido para transmitir imágenes en tiempo real con la suficiente resolución para poder llevar a cabo las tareas de inspección. Por tanto, como ya se ha mencionado en apartados anteriores, se opta por un sistema de comunicación físico, es decir, colocar un cable de comunicaciones entre el PC y el sumergible.

4.2.10. 8-12B Otros sistemas

Estos apartados se colocarán todos juntos, ya que algunos no tienen contenido o se desarrollarán en las siguientes fases del proyecto.

En referencia a los sistemas auxiliares (8), el vehículo no cuenta con ningún sistema que podamos determinar como auxiliar y en caso de que alguno pudiera tener esta consideración se añadirá posteriormente a la sección.

En cuanto a la protección del casco y anclajes, es un tema que se definirá en fases posteriores del diseño. De todos modos, se esbozan unos cuantos requisitos: el sumergible requerirá de una capa protectora (pintura) para algunos de los elementos sin protección, así como también anclajes para poder sujetar el vehículo en las maniobras referentes al inicio y final del período de navegación.

Finalmente, tenemos los tres apartados de consumos energéticos, pesos y costes. Los costes máximos ya están definidos, por tanto la lista de costes se adaptará al presupuesto y no al contrario. Las dos listas restantes se confeccionarán una vez seleccionados los componentes precisos y extraídos sus datos de las hojas de especificaciones.

Una vez finalizada el ciclo B, se deriva el diseño representado en la Fig. 7. Este modelo define bastante bien todos los conceptos explicados anteriormente.

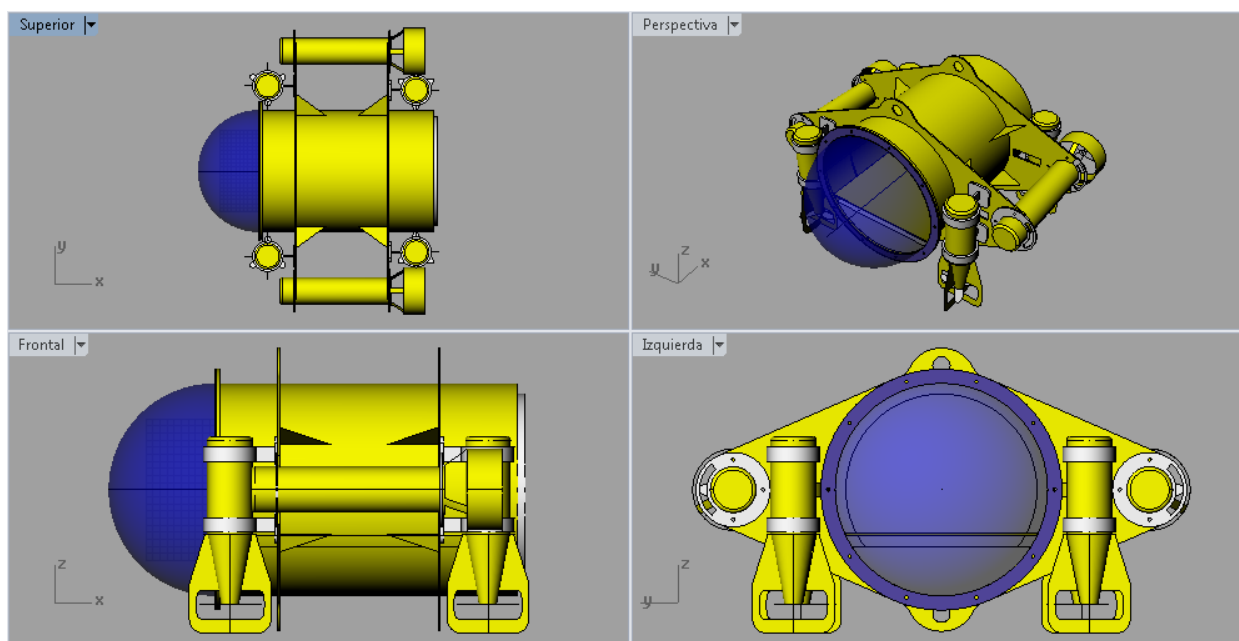


Fig. 7. Diseño Conceptual al final del ciclo B (Martínez, 2015)

4.3.Diseño Preliminar

En esta fase del diseño se incluirán más detalles y ya se definen los elementos a utilizar en cada sistema y los componentes reales que van a desarrollar esa labor. Una vez finalizada esta fase, el sumergible diseñado y el real deben ser considerablemente próximos y solo se aceptarán variaciones debidas a cambios que se produzcan durante la fase de construcción por motivos varios.

4.3.1.Requisitos de rendimiento

| Requisito | Datos |
|-------------|--|
| Profundidad | Se mantendrá la profundidad de 10 metros como la profundidad máxima. Por razones de seguridad de los distintos componentes a utilizar, la profundidad de servicio se reduce a 5m. |
| Rango | Una vez realizados los cálculos para el suministro eléctrico, se determina que el cable umbilical que proporciona la energía a bordo limitará el rango debido a que, como se puede ver en la Tabla 15, la distancia para un suministro de potencia a 12V queda bastante restringido. En el apartado de sistema eléctrico se realizan los cálculos para determinar esta distancia. Por tanto, el rango de operación queda restringido y vinculado al apartado de sistema eléctrico. |
| Velocidad | La velocidad exacta de desplazamiento se determinará en las pruebas de mar. No hay un requisito mínimo de velocidad mientras el sumergible tenga la capacidad de desplazarse. |
| Maniobra | El vehículo submarino debe tener la capacidad de desplazarse en todas las direcciones; por tanto, se determina que el sistema de maniobra se comprenderá íntegramente de propulsores, 2 horizontales para desplazamiento y maniobra en plano horizontal y otros 4 verticales para garantizar la estabilidad y realizar las maniobras de inmersión. |

| | |
|------------------------------|---|
| Peso | No se presenta un límite de peso para el vehículo, pero este debe poder ser introducido e izado de la superficie del agua con facilidad. En el apartado de desplazamiento se incluye una lista con los pesos detallados. |
| Sistema de inspección | Con el fin de cumplir el requisito de inspección, se instalará en el interior del vehículo submarino una videocámara IP con el objetivo de garantizar la obtención de registros gráficos de calidad y transmitirlos a superficie con eficiencia. |
| Medidas de seguridad | Las medidas de seguridad con las que contará el vehículo submarino son las siguientes: <ul style="list-style-type: none"> • Alarma de inundación • Control de temperatura de los componentes susceptibles a calentarse • Protección del sistema eléctrico ante cortocircuitos y sobrecargas • Control de consumos en el sistema eléctrico. • Sistema de emersión de emergencia |
| Estados de la mar limitantes | Este submarino se diseña para misiones en interiores de puertos, dársenas, diques y zonas resguardadas en general. Por tanto, todas las condiciones de mar que difieran de las citadas anteriormente limitan el uso de este vehículo. |

4.3.2. Disposición de los elementos

4.3.2.1. Casco resistente

Se puede observar plasmado en la Fig. 89 el diseño final del casco resistente. Se formalizará con material plástico, concretamente con un cilindro de policloruro de vinilo (PVC) con un diámetro de 160mm y una longitud total del casco resistente en 580mm. En la apertura de popa se dispondrá un tapón con rosca dotado de una junta de presión para garantizar un buen nivel de sellado, para solventar el montaje del tapón con rosca se deberá incluir un manguito de unión entre este y el cilindro. En la apertura de proa, de forma fija y sellada debidamente, se instalará una semiesfera de **PMMA** (polimetilmetacrilato) para la colocación en su interior del equipo de inspección. Para la fijación de la semiesfera acrílica al cilindro del casco resistente se incorporará una anilla perforada adosada al cilindro sobre la cual descansarán las solapas de la semiesfera y se fijarán con pernos, conformando así un casco resistente sólido.

4.3.2.2. Sistemas exteriores

En el exterior del vehículo submarino se colocarán dos estructuras perpendiculares al casco resistente, como se puede observar en la Fig. 8. Estas dos estructuras serán las encargadas de sujetar todos los componentes que queden en el exterior del casco resistente y de servir como puntos de fijación para el izado del sumergible. Esta estructura se realizará a partir de una lámina de PVC de 4mm de espesor y una longitud de 580mm para proporcionar ventajas de navegabilidad en el plano horizontal y facilitar el trabajo de estabilización. Los elementos que quedan al exterior del casco resistente son los siguientes y pueden observarse en la Fig. 8:

- 2 Propulsores horizontales (motor DC, eje, hélice y tobera).
- 4 propulsores verticales (motor DC, eje, hélice y tobera).
- 2 Focos LED, no se encuentran plasmados en la Fig. 8 debido a que hasta haber adquirido el modelo en concreto no se conocerán las medidas exactas.

4.3.2.3. Sistemas interiores

En el interior del casco resistente se colocan dos raíles laterales sobre los cuales va montado todo el sistema energético, de control e inspección del vehículo. A continuación se incluye una lista de todos los elementos que se incorporan en el interior del sumergible.

- Chipkit WF32 como microcontrolador principal
- Enrutador Wifi/Ethernet
- Regulador de tensión Step-Up 12V
- Regulador de tensión Step-Down 7,2V
- 4 x Controladora de Motores DC (propulsores verticales)
- 2 x Controladora de Motores DC (Propulsores horizontales)
- Videocámara IP
- Conjunto de relés
- Sensores de corriente
- Sensores de temperatura
- Sensor de presión.

4.3.3. Geometría

A continuación se incluyen las dimensiones principales de todos los elementos con desplazamiento y el cálculo del total del mismo.

| Elemento | Longitud [mm] | Diámetro [mm] | Volumen | Volumen*Unidades [mm^3] |
|--------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------------------|
| Casco resistente | 500,00 | 160,00 | 10053096,49 | 10053096,49 |
| Semiesfera | | 160,00 | 1072330,29 | 1072330,29 |
| Propulsores Horizontales | 285,00 | 40,00 | 358141,56 | 716283,125 |
| Propulsores Verticales | 210,00 | 32,00 | 168892,02 | 675568,0842 |
| Focos | 76,00 | 74,00 | 326863,87 | 653727,7321 |

| | | | | |
|---------------|-------------|------|--------|-----|
| Volumen Total | 13171005,73 | mm^3 | 0,0132 | m^3 |
| | | | 13,17 | L |

| | | |
|----------------|-------|----|
| Desplazamiento | | |
| Agua dulce | 13,17 | Kg |
| Mar | 13,50 | Kg |

Tabla 5. Cálculo de desplazamiento

4.3.4. Sistema de propulsión

En la descripción del sistema propulsivo se deben diferenciar los dos tipos distintos de propulsores con los que cuenta el sumergible: los propulsores horizontales y los propulsores verticales.

4.3.4.1. Propulsores horizontales

Los propulsores horizontales se encargan de la propulsión en el plano horizontal (avante, atrás y rotación). Como se puede observar en la «Fig. 89. Plano vista de planta.», estos van instalados en los extremos de las dos estructuras perpendiculares al casco de presión. Se optó por el montaje de los propulsores horizontales a una distancia igual a la eslora total del vehículo para así garantizar un buen régimen de maniobra. El eje de los propulsores forma una circunferencia con la eslora del sumergible, como puede verse a continuación en la figura Fig. 8.

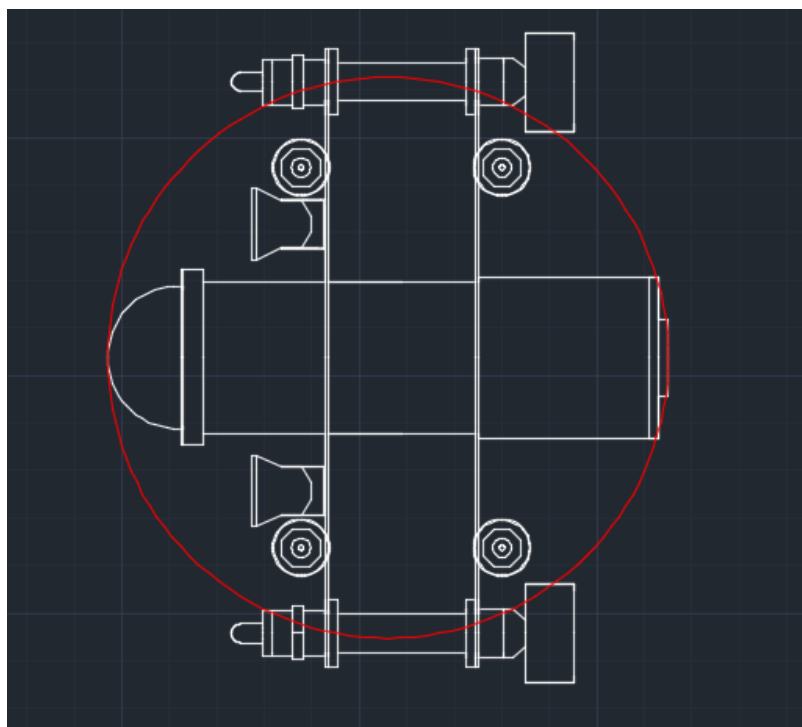


Fig. 8. Circunferencia eslora-eje de los propulsores

A continuación se incluye una lista detallada de los elementos que componen cada uno de los dos propulsores horizontales:

| Elemento | Descripción y función |
|---------------------------------------|--|
| Tubo PVC | Tubo de PVC con diámetro exterior de 40mm y una pared de 3mm con una longitud total de 225mm. Recomendación de PVC acrílico para facilitar el proceso de construcción. Este componente forma el cuerpo principal del propulsor |
| Manguito liso-rosca PVC de presión | Manguito de PVC para presión con diámetro interior de 40mm en parte lisa y rosca interior con diámetro 40mm en la cara opuesta. Utilizado para crear el cierre practicable de proa. |
| Tapón roscado | Tapón de PVC con rosca exterior con diámetro de 40mm. Cierra la proa del propulsor. |

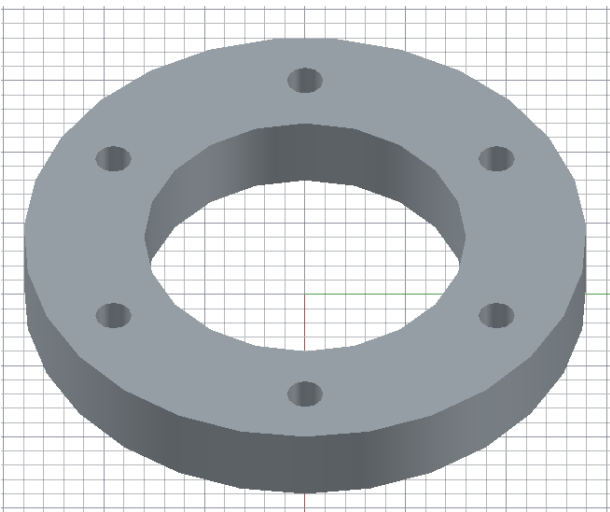
| | |
|--------------------------------|--|
| 2 x Anillas impresas en 3D | <p>Dos anillas con diámetro interior de 40mm y exterior de 70mm con un grosor de 10mm y 6 orificios con ángulos iguales entre ellos de 4mm de diámetro. Estas anillas son la sujeción del propulsor con las estructuras laterales mediante la fijación de pernos a través de los orificios.</p>  <p>Fig. 9. Diseño anillas soporte.</p> |
| Reducción PVC de presión 90-40 | Pieza de PVC cónica de reducción de diámetros interiores de 90mm a 40mm, estas piezas deberán ser mecanizadas para convertirlas en las toberas de protección de la hélice. |
| Reducción PVC de presión 40-20 | Pieza de PVC cónica de reducción de diámetros interiores de 40mm a 20mm, estas piezas deberán ser mecanizadas para lograr un cono final del eje. |
| Anilla Impresa en 3D | Disco de 35mm de diámetro con 3 de espesor y un orificio de 6mm de diámetro en el centro. Colocado en el centro del propulsor hace la función de chumacera de apoyo. |
| Anilla Impresa en 3D | Disco de 20mm de diámetro con 3mm de espesor con un orificio de 6mm en el centro hace la función de cierre del eje en popa. |
| Motor DC | Motor eléctrico de corriente continua con una potencia de salida de 47W, modelo Cebekit C-6044 con hoja de especificaciones técnicas incluida en referencias (Cebekit) |
| Eje con bocina | Eje de 200mm de longitud con diámetro de 4mm y bocina de 140mm con 6mm de diámetro. Se rellena de grasa entre la bocina y el eje para garantizar el sellado. |
| Unión de eje | Pieza de unión fija para unir el eje del motor de 3,17mm con el eje de 4mm |
| Pasacables | Pasacables con protección IP68 que va colocado atravesando el tapón roscado de proa del propulsor para introducir en el interior de este el cable de alimentación del motor. |
| Hélice | Hélice de tres palas con 65mm de diámetro de la circunferencia descrita. |

Tabla 6. Componentes de un propulsor horizontal

4.3.4.2. Propulsores verticales

El vehículo submarino consta de cuatro propulsores verticales fijados en las estructuras laterales del casco de presión, como se puede ver en la Fig. 10 o en la Fig. 90. Estos propulsores tienen la finalidad de controlar el proceso de inmersión, ya que este vehículo solo cuenta con sistemas de inmersión dinámicos. También son los encargados de mantener la estabilidad e introducir grados de escora o cabeceo en caso de que fuera necesario durante la navegación. En la sección de Control se definirá el funcionamiento de los sistemas de estabilidad.

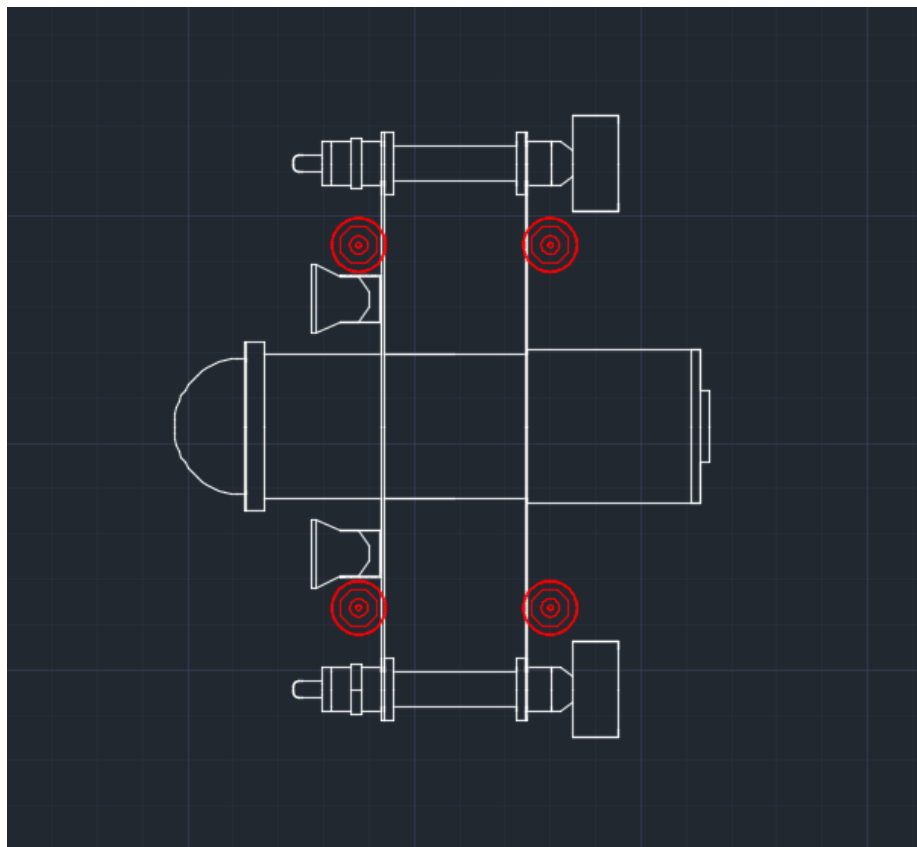


Fig. 10. Posición de los propulsores horizontales

A continuación se detallará una lista con los elementos que forman uno de los propulsores verticales.

| Elemento | Descripción y función |
|---------------------------------------|---|
| Tubo PVC | Tubo de PVC con diámetro exterior de 32mm y una pared de 3mm con una longitud total de 160mm. Recomendación de PVC acrílico para facilitar el proceso de construcción. Este componente forma el cuerpo principal del propulsor. |
| Manguito liso-rosca PVC de presión | Manguito de PVC para presión con diámetro interior de 32mm en parte lisa y rosca interior con diámetro 32mm en la cara opuesta. Utilizado para crear el cierre practicable de la parte superior del propulsor. |
| Tapón roscado | Tapón de PVC con rosca exterior con diámetro de 32mm. Cierra la parte superior del propulsor. |

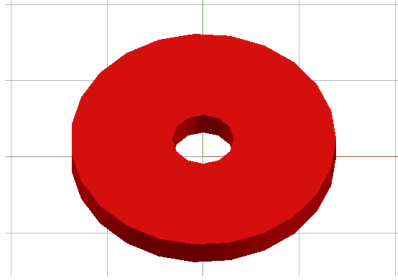
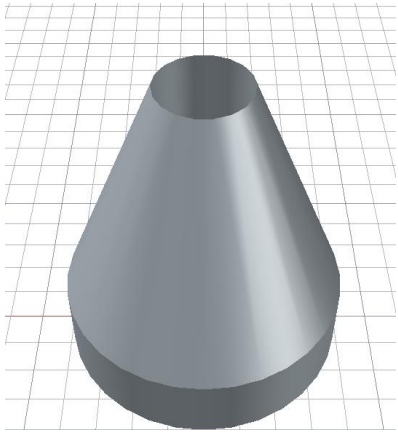
| | |
|--------------------------------|---|
| Reducción PVC de presión 50-32 | Pieza de PVC cónica de reducción de diámetros interiores de 50mm a 32mm, estas piezas deberán ser mecanizadas para convertirlas en las toberas de protección de la hélice. |
| Reducción PVC de presión 32-20 | Pieza de PVC cónica de reducción de diámetros interiores de 32mm a 20mm, estas piezas deberán ser mecanizadas para lograr un cono final del eje. |
| Anilla impresa en 3D | <p>Disco de 27,7mm de diámetro con 3 de espesor y un orificio de 6mm de diámetro en el centro. Colocado en el centro del propulsor hace la función de chumacera de apoyo.</p>  <p>Fig. 11. Vista 3D de la chumacera de apoyo</p> |
| Cono impreso en 3D | <p>Disco de 20mm de diámetro con 3mm de espesor con un orificio de 6mm en el centro hace la función de cierre del eje en popa.</p>  <p>Fig. 12. Cono de cierre del eje</p> |
| Motor DC | Motor eléctrico de corriente continua Graupner Speed 400 7.2V con su hoja de especificaciones técnicas incluida en el apartado de Referencias (Graupner) |
| Eje con bocina | Eje de 150mm de longitud con diámetro de 4mm y bocina de 90mm con 6mm de diámetro. Se rellena de grasa entre la bocina y el eje para garantizar el sello. |
| Unión de eje | Pieza de unión fija para unir el eje del motor de 2.3mm con el eje de 4mm |
| Pasacables | Pasacables con protección IP68 que va colocado atravesando el tapón roscado de la parte superior del propulsor para introducir en el interior de este el cable de alimentación del motor. |
| Hélice | Hélice de 3 palas y 45mm de diámetro de la circunferencia descrita. |

Tabla 7. Componentes de un propulsor vertical.

4.3.5. Sistema eléctrico

El sistema eléctrico de este vehículo, junto con el apartado de control, posiblemente sean los dos apartados más complejos del proyecto. En este apartado se describirá cada una de las partes del sistema de suministro eléctrico que componen el sumergible.

4.3.5.1. Selección de la fuente de alimentación

Para poder seleccionar la fuente de alimentación correcta se debe tener la suma de todos los consumos en las peores condiciones de trabajo y definir las características del cable umbilical que transportará la energía a bordo del vehículo.

Iniciando este proceso de diseño, se incluye a continuación una tabla en la que se refleja el balance energético en la peor de las condiciones de operación.

| Componente | Consumo u. [A] | Unidades | Consumo [A] | Voltaje [V] | Potencia [W] |
|--------------------------|----------------|----------|-------------|-------------|--------------|
| Cámara IP | 1 | 1 | 1 | 12 | 12 |
| Enrutador | 1 | 1 | 1 | 12 | 12 |
| Chipkit | 0,6 | 1 | 0,6 | 12 | 7,2 |
| Focos | 0,5 | 2 | 1 | 12 | 12 |
| Propulsores verticales | 4 | 4 | 16 | 7,2 | 115,2 |
| Propulsores Horizontales | 7 | 2 | 14 | 12 | 168 |

| | |
|-------|---------|
| Total | 326,4 W |
|-------|---------|

| |
|---|
| Selección de fuente de alimentación de 12 V |
| Amperios necesarios 27,2 A |

Tabla 8. Balance energético.

Como puede observarse en la Tabla 8, se recomienda el uso de la medida estándar superior, por lo que se define que la fuente de alimentación debe ser capaz de suministrar 30 amperios contando con un 10% de margen entre el consumo máximo y la potencia máxima entregada por la fuente. Definida la capacidad de la fuente, se realiza un estudio de mercado con la finalidad de hallar la misma.



Fig. 13. Fuente de alimentación seleccionada. (PC Computer Deals, 2015)

En la Fig. 13 puede verse una imagen de la fuente de alimentación seleccionada y a continuación se incluyen las características principales de la misma.

- Entrada: 230V AC
- Salida: 12V AC 30A
- Protecciones: Cortocircuito, sobrecarga y sobrevoltaje.
- Ajuste del voltaje de salida de un 10%.

Una vez se ha seleccionado la fuente de alimentación y siguiendo el circuito eléctrico básico descrito en la Fig. 6 se debe dimensionar el cable umbilical.

4.3.5.2. Selección y dimensionado del cable umbilical.

Como se puede observar en Forum Energy Technologies (2014), los ROVs profesionales tienen un sistema que eleva la tensión del cable umbilical para así no tener problemas de caída de voltaje. En el caso de este proyecto, se deberá prescindir de este sistema y la alimentación se realizará a 12V por el cable umbilical. Este hecho limita el rango de operación del vehículo, ya que la tensión del cable umbilical limitara la longitud para no tener una caída de voltaje demasiado grande al final de la línea.

El cable que se puede utilizar de mayor sección es una manguera recubierta de dos conductores con 6mm² cada uno para ceñirse al presupuesto. En la Tabla 9 se determina la longitud de esa manguera para poder garantizar una caída de tensión razonable al final de la línea.

La caída de tensión en una línea la calculamos de la siguiente manera:

$$E = R \cdot I$$

Ecuación 2. Calculo de la caída de tensión

Donde:

- E es la caída de tensión
- R es la resistencia según la longitud del cable obtenida de (Cablens S.A, Grupo Condumex, 2015)
- I es la intensidad que circula por la línea.

Tabla de caídas de tensión con cable de 6mm² según longitudes [V]Resistencia del cable 0,0033 Ω /m

| Longitud [m] | Caso 1: Solo electrónica 2,6 A | Caso 2: 50% de consumo 13,6 A | Caso 3: Consumo máximo 27,2 A |
|--------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 0,02 | 0,09 | 0,18 |
| 2 | 0,03 | 0,18 | 0,36 |
| 3 | 0,05 | 0,27 | 0,54 |
| 4 | 0,07 | 0,36 | 0,72 |
| 5 | 0,09 | 0,45 | 0,90 |
| 6 | 0,10 | 0,54 | 1,08 |
| 7 | 0,12 | 0,63 | 1,26 |
| 8 | 0,14 | 0,72 | 1,44 |
| 9 | 0,15 | 0,81 | 1,62 |
| 10 | 0,17 | 0,90 | 1,80 |
| 11 | 0,19 | 0,99 | 1,97 |
| 12 | 0,21 | 1,08 | 2,15 |
| 13 | 0,22 | 1,17 | 2,33 |
| 14 | 0,24 | 1,26 | 2,51 |
| 15 | 0,26 | 1,35 | 2,69 |
| 16 | 0,27 | 1,44 | 2,87 |
| 17 | 0,29 | 1,53 | 3,05 |
| 18 | 0,31 | 1,62 | 3,23 |
| 19 | 0,33 | 1,71 | 3,41 |
| 20 | 0,34 | 1,80 | 3,59 |

Tabla 9. Caídas de tensión según longitud del cable y consumo

El caso relevante de la Tabla 9 corresponde al caso de consumos máximos, ya que es el momento en el que la caída de tensión es superior. Para poder seleccionar el cable a elegir se debe determinar un porcentaje máximo de caída de voltaje que lo fijaremos en un 20%, teniendo así que incorporar reguladores de tensión para los sistemas que precisen un voltaje muy preciso como los componentes electrónicos. Una vez establecido un límite del 20% de caída, se busca el porcentaje justamente inferior a este que cumple los requisitos y lo encontramos en 13m, como se puede ver en la siguiente tabla.

| Longitud [m] | Caso 1 [V] | Caso 2 [V] | Caso 3 [V] |
|-------------------------|------------|------------|------------|
| 13 | 11,78 | 10,83 | 9,67 |
| Porcentaje de caída [%] | 1,859 | 9,724 | 19,448 |

Tabla 10. Características de caída de tensión para 13m de cable.

4.3.5.3. Reguladores de tensión

En este punto, el cable umbilical y la longitud de este ya están determinados y, siguiendo el circuito eléctrico del ROV, se procederá a la selección de los reguladores de tensión para los sistemas que requieran voltajes distintos o definidos.

A continuación se incluye una tabla que muestra los reguladores que se incorporaran y cómo se distribuirán los distintos componentes del sumergible.

| Componentes | Tensión | Regulador |
|--|---------|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Chipkit WF32 (Digilent., 2013) y circuitos de control • Enrutador • Cámara IP • Focos | 12V | <p>En este caso se utilizará un regulador “Step-up” que mantendrá la tensión fija a 12V en los momentos en que la tensión de la línea descienda.</p> <p>12-9,67 V → 12 V</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> • Motores DC de los propulsores verticales (Graupner) | 7,2V | <p>Para esta rama de la distribución de potencia se colocará un regulador “Step-down” que rebajará la tensión que entre por la línea a unos 7,2 V estables a los que funcionan los motores DC.</p> <p>12-9,67 V → 7,2 V</p> |
| <ul style="list-style-type: none"> • Motores DC de los propulsores horizontales (Cebekit) | 6-12V | <p>Estos motores son capaces de funcionar en todo el rango de tensiones que se pueden presentar y por tanto no requieren ningún tipo de regulación.</p> |

Tabla 11. Reguladores de tensión y componentes

4.3.5.4. Protecciones

El circuito eléctrico contará con diversas protecciones. La primera engloba todas las protecciones que contiene propiamente la fuente de alimentación y que están descritas en el apartado correspondiente. En segundo lugar, los reguladores incluyen protecciones contra sobrecarga. Como tercera fase de protección se incluirá un fusible para cada uno de los componentes externos al casco de presión, como se describe a continuación:

- Motores DC de los propulsores horizontales (Cebekit) → Fusibles retardados de 10 A.
- Motores DC de los propulsores verticales (Graupner) → Fusibles retardados de 8 A.
- Focos led → Fusible de 8 A.

4.3.6.Control y navegación

Los sistemas de control y navegación de este ROV son bastante complejos y están compuestos por un hardware, que está conformado por todos los circuitos electrónicos que se encuentran en el interior del sumergible; y, por otra parte, con el software, que controla todos los componentes mencionados anteriormente y que se encuentra en el PC de control e inspección en la superficie. En los siguientes puntos se describirán todos los elementos que conforman este sistema.

4.3.6.1. Unidad principal de control

Esta unidad está conformada por un microcontrolador de la marca Digilent™ modelo Chipkit WF32. Sus características se describirán a continuación y son extraídas del manual oficial (Digilent., 2013).



Fig. 14. Chipkit WF32 (Digilent, 2015)

Características principales:

- Microcontrolador de 32bits
- 512 Kb de memoria flash y 128 Kb de memoria RAM
- Módulo wifi integrado
- 43 pins I/O digitales
- 12 entradas analógicas
- Entrada de suministro a 12 V
- Voltaje lógico de 3.3 V

Este microcontrolador será el encargado de recopilar todos los datos de los sensores para posteriormente enviarlos al PC de control donde se realizarán los cálculos oportunos y se le devolverán las órdenes para regular la potencia de los actuadores.

4.3.6.2. Sistema de comunicación

El sistema de comunicación de este sumergible está compuesto por un enrutador montado en el interior del vehículo submarino. Mediante protocolo TCP/IP proporciona un enlace de comunicación entre la unidad principal de control, la videocámara de inspección y el PC de control en superficie. Eso significa que en el cable umbilical se incluye un cable tipo CAT5 con conectores RJ45 a los extremos para proporcionar el enlace del sumergible con el equipamiento exterior. La videocámara de inspección se conecta del mismo modo descrito previamente. En cambio, la unidad principal de control, al no contar con un sistema de conexión física, se conecta al enrutador mediante un enlace inalámbrico, utilizando así el módulo wifi integrado en esta.

4.3.6.3. Sensores

El vehículo submarino cuenta en el interior con siete tipos distintos de sensores. A continuación se incluye una lista con cada uno de los sensores y su descripción.

- Sensor de inundación:** Es el sensor más sencillo con el que cuenta el vehículo. Este sensor consiste en un conector con dos pines que no están unidos entre ellos y que se colocan en la zona inferior del casco de presión para que, en caso de inundación, el agua cierre el circuito y eleve la tensión a un 1 lógico en una de las entradas I/O de la unidad principal de control. Seguidamente, el software, al detectar esta circunstancia, hará saltar la alarma de inundación. Teniendo en cuenta que en el agua potable se ha medido una resistencia aproximada de 50 K Ω entre los contactos del sensor y el agua de mar, tiene una resistencia muy inferior. Se diseña un sistema para que el contacto con el medio menos conductor en el que puede navegar el vehículo submarino haga saltar una alarma de inundación en caso de tener una vía de agua. Por tanto, se diseña el siguiente sistema mediante un simulador de electrónica (Falstad, 2015).

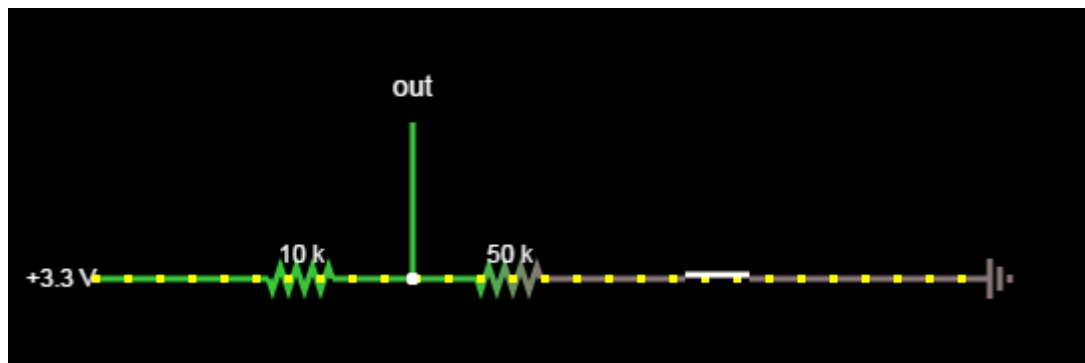


Fig. 15. Circuito electrónico para el sensor de inundación.

Pudiendo determinar en el simulador la variación de tensión en el terminal de salida, se conecta este a una entrada analógica de la unidad principal de control y así mediante software se determina el estado seco o húmedo del sensor.

- **Sensor de presión:** El sensor de presión instalado en este vehículo tiene la función de determinar la profundidad a la que se encuentra el mismo. El sensor de presión utilizado es el modelo MPX5050 (Freescale, 2007-2015), con la hoja de datos técnicos incluida en el apartado de «Referencias». Este sensor mide la presión diferencial entre dos puertos. Uno obtiene la presión interior del vehículo y el segundo obtiene la presión exterior. Enviando estos datos al software de control y realizando los cálculos oportunos obtenemos la profundidad a la que se encuentra el sumergible.

Este sensor tiene una salida de datos analógica que recibe la unidad principal de control y los envía al PC. El software de control es el encargado de convertir las unidades de tensión que provienen del sensor para obtener una presión y posteriormente una profundidad.



Fig. 16. Sensor de Presión MPX5050 (Octopart, 2015).

- **Sensores de corriente:** Todos los propulsores cuentan con un sensor de corriente instalado en su línea de alimentación. Estos proporcionan datos útiles sobre el funcionamiento de los propulsores, ya que sabiendo su consumo se puede saber si hay algún problema en su funcionamiento. En el ROV se instalarán dos tipos de sensores de corriente, los dos del modelo ACS712, uno con un rango de medición de ± 5 A y otro con un rango de ± 30 A. Los cuatro propulsores verticales contarán cada uno con un medidor del modelo de ± 5 A, ya que estos motores no superan dicho valor. En cambio, los propulsores horizontales, al tener un consumo superior, contarán con un medidor cada uno del modelo de ± 30 A. Estos sensores también cuentan con una salida de datos analógica y, por tanto, el valor de tensión deberá ser convertido debidamente mediante software según el rango de operación de cada uno de los modelos de sensor utilizados.

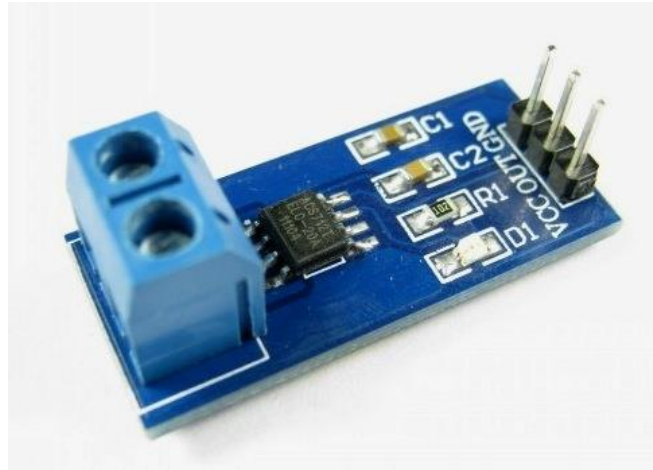


Fig. 17. Sensor de corriente ACS712 (Arduino, 2015).

- **Sensor magnético/Compas:** Este sensor está destinado a proporcionar el rumbo hacia el que está apuntando la proa del sumergible. En concreto se utiliza el modelo HMC5883L de la empresa Honeywell™, en la sección «Referencias» se puede encontrar la hoja de datos técnicos de este componente (Honeywell, 2015). Este sensor magnético digital proporciona datos sobre los campos magnéticos que lo cruzan y que mediante software es posible convertirlo en el rumbo magnético.

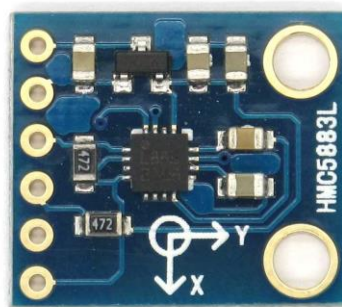


Fig. 18. Sensor magnético HMC5883L (Honeywell, 2015)

- **Acelerómetro/Giróscopo:** Este sensor proporciona información sobre la posición relativa del vehículo respecto al centro de gravedad terrestre (acelerómetro) y de la velocidad de giro en los tres ejes de coordenadas (giróscopo). Los datos del acelerómetro serán utilizados para determinar el trimado y la escora del vehículo. Para la implementación de este sensor se utilizará el modelo IMU MPU-6050 de la compañía InvenSense, en la sección de referencias se incluye la hoja de datos técnicos sobre este componente (InvenSense, 2013). Este sensor se comunica con la unidad principal de control mediante el protocolo de comunicación I²C, un protocolo de comunicación digital.

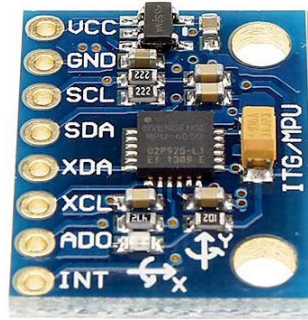


Fig. 19. MPU-6050

- **Sensores de temperatura:** Con el fin de poder monitorizar las temperaturas de los componentes susceptibles a sufrir aumentos peligrosos de temperatura, se colocarán estratégicamente sensores para tal fin. El modelo a utilizar es el TMP35 de la compañía ANALOG DEVICES, con la hoja de características técnicas incluida en la sección de referencias (Analog Devices, 2015). Estos sensores emiten una señal analógica que es recogida por la unidad central de control y mediante software se hacen los cálculos oportunos con el fin de obtener la temperatura de cada uno de los componentes monitorizados.

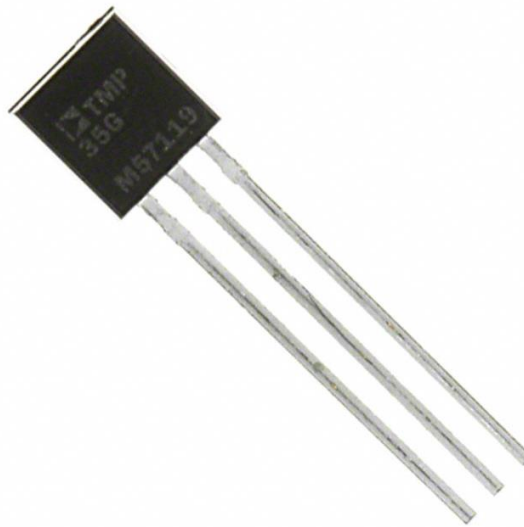


Fig. 20. Sensor TMP35 (Digchip, 2015)

4.3.6.4. Controladoras de Motores DC

En el diseño del vehículo submarino se ha optado por la utilización de dos tipos de controladoras distintas: el primer tipo de menor potencia para los propulsores verticales y un tipo de mayor potencia para los propulsores horizontales. A continuación se describen estos dos tipos de controladores.

- **L298N:** Este controlador se basa en un puente doble, del cual utilizaremos todas las salidas para un solo motor DC, obteniendo así una corriente nominal de funcionamiento de 4 A, pudiendo llegar a picos momentáneos de 5 A. En total se instalarán 4 controladores de este modelo. Cada una de estas controladores tiene 3 cables de datos digitales conectados a la unidad principal de control, dos de ellos determinan la dirección de giro del motor DC y el tercero la velocidad de este mediante la regulación de la tensión de salida. En la sección de referencias se incluye la hoja de especificaciones técnicas de este componente (ST, 2000). Este componente consta de un disipador de calor, así como de sistemas de protección frente a sobrecalentamiento y sobrecarga.

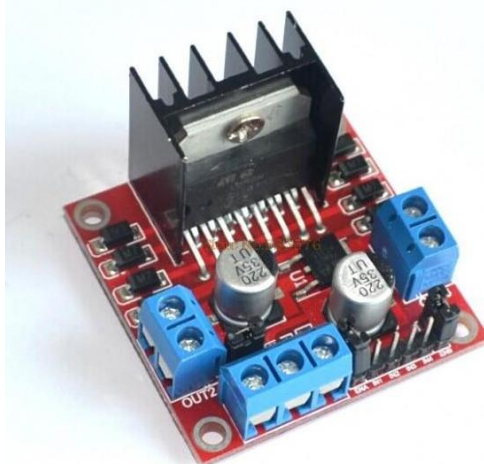
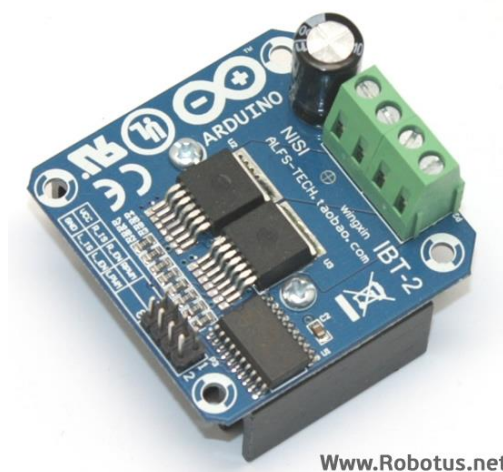


Fig. 21. Controlador LM298N (Tronixlabs, 2015)

- **BTS7960B:** Este controlador se forma mediante dos medios puentes, obteniendo así las dos direcciones de rotación para un solo motor DC de hasta 40 A, muy superior a nuestro valor de funcionamiento, ya que se utilizarán 7 A en funcionamiento normal. Se instalarán dos unidades de este modelo, uno para cada uno de los propulsores horizontales. Este controlador consta de cuatro conexiones de comunicación digitales cada una con la unidad principal de control. Dos de ellas determinan la dirección de giro y las otras dos, la velocidad de giro de cada una de las direcciones. El componente consta de un disipador de calor, así como de protecciones diversas para evitar los posibles daños que pueda sufrir por temperatura, sobrecarga o sobretensión.



Www.Robotus.net

Fig. 22. Controlador BTS7960B (Robotus, 2015)

4.3.6.5. Software de control

El software de control se implementará mediante la plataforma Labview™ (National Instruments, 2015) de la compañía National Instruments™ (NI, 2015). Este software se basa en un lenguaje de programación visual mediante cuadros, donde se simula un sistema en el cual existe un interior, que correspondería a la programación con cuadros y luego un panel frontal, como si de un instrumento de laboratorio se tratase, donde se pueden colocar indicadores y controles.



Fig. 23. Logo de Labview™ (National Instruments, 2015)

Con el fin de obtener conectividad entre la unidad principal de control y el PC de control, se utilizará un complemento de Labview™ llamado LINX (MakerHub, 2015) capaz de proporcionar dicha conectividad entre Labview™ y microcontroladores como Arduino o Chipkit.

La programación del software del sumergible se deberá separar en varias partes para así cumplir cada uno de los distintos objetivos de navegación e inspección. En un primer esquema para el planteamiento del programa se incluye el siguiente listado:

- Control de motores.
- Dispositivo de entrada de datos (mando, joystick,...).
- Control de estabilidad.
- Control de profundidad.
- Sistemas de seguridad y monitorización.
- Sistemas de inspección.

Una vez definidos estos puntos preliminares, se deberá diseñar cada uno de ellos por separado, haciendo pruebas de funcionamiento antes de unir todos los componentes e interconectarlos. En la fase de construcción se detallará el proceso de implementación de cada una de las partes del software.

Existen unos requisitos que el software de control debe ser capaz de cumplir:

- Suficiente velocidad de cálculo para un control suave.
- Capacidad de tener automatismos que den una respuesta según las entradas.
-

Inicialmente Labview™ cumple con estos requisitos y puede desarrollar esta labor.

4.3.7. Sistemas auxiliares

4.3.7.1. Control dinámico

El vehículo submarino consta de cuatro propulsores verticales para poder realizar ajustes dinámicos, tanto de estabilidad como de profundidad. Estos ajustes se realizan mediante software incorporado en el PC de control, usando los datos de los sensores internos del vehículo submarino.

En el caso del control de estabilidad se usa el acelerómetro como sensor. Sabiendo los datos de trimado y escora del ROV se puede regular debidamente la potencia de cada uno de los propulsores para garantizar que este siempre se mantenga estable en la posición requerida.

En el caso de la profundidad, se usa el sensor de presión para determinar la profundidad actual del vehículo. Mediante software se introduce una profundidad objetivo y este realiza un segundo ajuste de los propulsores verticales con el fin de ascender o descender a la profundidad requerida.

4.3.7.2. Sistema de ascenso de emergencia

Como medida de seguridad se incorporará un sistema de ascenso de emergencia, en el cual se activarán los 4 propulsores a máxima potencia para una emersión lo más rápida posible y segura hasta la superficie.

4.3.7.3. Sistemas de la misión: inspección

Con el objetivo de cumplir la misión de inspección se instalarán dos complementos al vehículo para poder desarrollar satisfactoriamente estas tareas. A continuación se describen estos elementos.

- Videocámara IP: este dispositivo será capaz de capturar imágenes en tiempo real y transmitirlos a la superficie para así poder llevar a cabo su objetivo. La conectividad de este dispositivo es directa con el PC de control mediante el protocolo TCP/IP y un cable CAT5 con conectores RJ45 en sus extremos.

Para desarrollar esta labor se ha seleccionado la siguiente videocámara:



Fig. 24. Cámara IP Sricam AP003

Esta videocámara se alimenta a 12V, la tensión de funcionamiento del vehículo submarino, dotada de sensores de infrarrojos, es capaz de obtener imágenes con niveles muy bajos de iluminación. Su visualización se puede realizar desde cualquier dispositivo con navegador y conectado a la misma red de área local que la videocámara, pudiéndose también exportar las imágenes en tiempo real a distintos programas para su adquisición o tratamiento.

- Sistema de iluminación: Con el fin de garantizar las condiciones óptimas para la inspección, se instalarán dos fuentes de luz, una a cada costado del casco resistente en la parte frontal del mismo. Estos componentes van montados en la parte exterior del vehículo y, por lo tanto, deben ser sumergibles. Para cumplir con tal cometido se han seleccionado los siguientes elementos:



Fig. 25. Focos Led sumergibles

Estos focos se alimentan a 12V, que es la tensión de funcionamiento de todos los componentes del vehículo submarino y tienen un consumo de 7W cada uno, sumando en total 14W. Tienen una estanqueidad de fábrica IP68 que garantiza la resistencia de estos frente a la presión del agua. El funcionamiento de los focos será controlado mediante un relé accionado por la unidad principal de control.

4.3.8. Equipo

En esta sección se incluyen los sistemas de anclaje y los sistemas de estanqueidad.

- Anclaje: la estructura adherida al casco resistente consta de anillas superiores para facilitar así la labor de izado desde la superficie del agua, la parte inferior consta de perforaciones para la correcta sujeción de los cables eléctricos exteriores.
- Estanqueidad: para garantizar una buena estanqueidad se utilizarán pasacables IP68 para las perforaciones del casco resistente y las entradas a los propulsores y juntas de goma para las tapas roscadas.

4.4.Diseño final

En cualquier proyecto el diseño debe ser lo más idéntico posible al resultado final. Sin embargo, como ocurre en la mayoría de casos, esto no es así y siempre hay variaciones. Por tanto, esta sección se reserva a los pequeños cambios o modificaciones que deban hacerse durante la fase de construcción respecto a lo diseñado hasta este punto, quedando esta sección de diseño final incluida en el capítulo de construcción, mencionándose cualquier elemento que se instale que difiera del diseño preliminar. En esta sección también quedarán incluidos muchos elementos que hasta la fase de construcción no se podrán determinar, como el peso de muchos elementos o la potencia propulsiva exacta.

Capítulo 5. Construcción

En este capítulo se describe el proceso de materialización del diseño descrito en los apartados anteriores.

5.1. Listado de materiales

A continuación se incluye un listado detallado de todos los elementos necesarios para realizar el montaje del vehículo submarino.

| Listado de materiales | | | | | |
|-----------------------|---|-------------------------------------|----|---|------------------------------|
| Unidades | | | | | |
| 1 | x | Relé | 2 | x | Plancha PVC rígido |
| 1 | x | Acelerómetro giróscopo MPU-6050 | 1 | x | Tubo PVC transparente 32mm |
| 1 | x | HMC5883L Sensor Magnético | 1 | x | Tubo PVC transparente 40mm |
| 1 | x | Controladora Motor L298N Doble H | 1 | x | Cemento Blanco |
| 4 | x | Conversores nivel lógico | 1 | x | Silicona translúcida |
| 1 | x | Regulador de tensión Step-up 100W | 1 | x | Bolas de acero |
| 1 | x | Sensor de presión 0-500mbar | 1 | x | Grasa bocinas |
| 1 | x | Regulador de tensión Step-down 100W | 3 | x | Reducción PVC 20a32-40 |
| 4 | x | Sensores de corriente 5A | 1 | x | Separadores metálicos varios |
| 2 | x | Sensores de corriente 30A | 4 | x | Reducción PVC 32a50-63 |
| 1 | x | Cámara IP | 4 | x | Manguito rosca hembra 32mm |
| 1 | x | Fuente de alimentación 30A | 4 | x | Tapón PVC roscable |
| 1 | x | Cable manguera alimentación | 2 | x | Manguito rosca hembra 40mm |
| 2 | x | Focos Sumergibles | 1 | x | Semiesfera metacrilato 150 |
| 1 | x | Cable manguera distribución | 2 | x | Tapón hembra PVC 40 |
| 1 | x | Arduino uno | 1 | x | Semiesfera metacrilato 180 |
| 2 | x | Conectores (cables jumper) | 1 | x | Manguito 160mm |
| 1 | x | Placa topos soldar | 1 | x | Tapón registro 160 |
| 1 | x | Chipkit WF32 | 12 | x | Abrazaderas PVC 32mm |
| 1 | x | Protoshield arduino | 2 | x | Reducción PVC 50-40-20 |
| 1 | x | Tiras de pines soldadura | 2 | x | Manguito mixto PVC 40 |
| 2 | x | Controladora motor BTS7960B | 2 | x | Tapón rosca 40 PVC |
| 6 | x | Uniones ejes | 2 | x | Reducción PVC 90-75-40 |
| 4 | x | Bocinas Propulsores verticales | 12 | x | Pasahilos estanco |
| 4 | x | Motor Speed 400 7,2V | 1 | x | Analizador lógico |
| 2 | x | Bocinas Propulsores Horizontales | 3 | x | Adhesivo N30 PVC |
| 2 | x | Motor DC 12V 47W | 1 | x | Estaño de soldar |

| | | | | | |
|---|---|-------------------|----|---|--------------------------------|
| 2 | x | Helice 3 palas 65 | 1 | x | pinzas RJ45 |
| 3 | x | Helice 3 palas 45 | 10 | x | Fusibles |
| 1 | x | Tubo PVC 160mm | 10 | x | Portafusibles |
| 2 | x | Router | 1 | x | Llave de filtros |
| | | | 1 | x | Tornillos, tuercas y arandelas |

Tabla 12. Listado de materiales

5.2. Presupuesto y adquisición de materiales

En este apartado se detallan todos los elementos a adquirir. Esta lista difiere en cierta manera de la Tabla 12, debido a que algunos de los elementos se han conseguido sin coste alguno o debido a que se han tenido que adquirir más unidades de las necesarias, ya fuera por fallos producidos durante la construcción o por no cumplir con las especificaciones requeridas.

| Descripción | Unidades | Precio | Total |
|-------------------------------------|----------|------------|----------|
| Electronica | | | |
| Relé | 2 | 3,30 € | 6,60 € |
| Controladora Motor L293D | 1 | 6,88 € | 6,88 € |
| Acelerómetro giróscopo MPU-6050 | 1 | 4,20 € | 4,20 € |
| HMC5883L Sensor Magnético | 1 | 4,75 € | 4,75 € |
| Controladora Motor L298N Doble H | 5 | 4,09 € | 20,45 € |
| Conversores nivel lógico | 4 | 1,94 € | 7,76 € |
| Regulador de tensión Step-up 100W | 1 | 5,24 € | 5,24 € |
| Sensor de presión 0-500mbar | 1 | 24,65 € | 24,65 € |
| Regulador de tensión Step-down 100W | 1 | 7,49 € | 7,49 € |
| Sensores de corriente 5A | 4 | 1,81 € | 7,24 € |
| Sensores de corriente 30A | 2 | 1,82 € | 3,64 € |
| Cámara IP | 1 | 53,99 € | 53,99 € |
| Fuente de alimentación 30A | 1 | 22,99 € | 22,99 € |
| Cable manguera alimentación | 1 | 33,08 € | 33,08 € |
| Focos Sumergibles | 2 | 7,01 € | 14,02 € |
| Cable manguera distribución | 1 | 11,75 € | 11,75 € |
| Arduino uno | 1 | 20,57 € | 20,57 € |
| Conectores (cables jumper) | 2 | 4,46 € | 8,92 € |
| Placa topas soldar | 1 | 3,09 € | 3,09 € |
| Chipkit WF32 | 1 | 75,00 € | 75,00 € |
| Protoshield arduino | 1 | 7,26 € | 7,26 € |
| Tiras de pines soldadura | 1 | 8,01 € | 8,01 € |
| Controladora motor BTS7960B | 2 | 13,29 € | 26,58 € |
| Cable CAT5 Ethernet | 1 | 7,99 € | 7,99 € |
| Fusibles y porta fusibles | 10 | 1,20 € | 12,00 € |
| | | | |
| | | Total sec. | 404,15 € |

| | | | |
|----------------------------------|----|-------------------|-----------------|
| | | | |
| Motores/mecánica | | | |
| Motor DC | 2 | 8,73 € | 17,45 € |
| Uniones ejes | 4 | 1,95 € | 7,80 € |
| Uniones ejes | 4 | 3,85 € | 15,38 € |
| Bocinas Propulsores verticales | 4 | 10,38 € | 41,50 € |
| Motor DC 6-24V 5W | 2 | 7,87 € | 15,73 € |
| Motor Speed 400 7,2V | 4 | 11,05 € | 44,20 € |
| Hélice 3 palas 50 | 2 | 4,09 € | 8,17 € |
| Hélice 3 palas 50L | 2 | 4,69 € | 9,37 € |
| Bocinas Propulsores Horizontales | 2 | 12,55 € | 25,10 € |
| Motor DC 12V 47W | 2 | 9,75 € | 19,50 € |
| Hélice 3 palas 65 | 2 | 8,62 € | 17,23 € |
| Hélice 3 palas 45 | 4 | 4,16 € | 16,62 € |
| | | | |
| | | Total sec. | 238,05 € |
| | | | |
| Materiales | | | |
| Plancha PVC rígido | 2 | 14,00 € | 28,00 € |
| Tubo PVC transparente 32mm | 1 | 8,10 € | 8,10 € |
| Tubo PVC transparente 40mm | 1 | 11,00 € | 11,00 € |
| Cemento Blanco | 1 | 3,35 € | 3,35 € |
| Silicona translúcida | 1 | 2,65 € | 2,65 € |
| Bolas de acero | 1 | 6,00 € | 6,00 € |
| Grasa bocinas | 1 | 18,12 € | 18,12 € |
| | | | |
| | | Total sec. | 77,22 € |
| | | | |
| Piezas | | | |
| Reducción PVC 20a32-40 | 3 | 1,53 € | 4,60 € |
| Separadores metálicos varios | 1 | 9,40 € | 9,40 € |
| Reducción PVC 32a50-63 | 4 | 2,00 € | 8,00 € |
| Manguito rosca hembra 32mm | 4 | 1,35 € | 5,40 € |
| Tapón PVC roscable | 4 | 1,30 € | 5,20 € |
| Manguito rosca hembra 40mm | 2 | 1,50 € | 3,00 € |
| Semiesfera metacrilato 150 | 1 | 12,80 € | 12,80 € |
| Tapón hembra PVC 40 | 2 | 1,30 € | 2,60 € |
| Semiesfera metacrilato 180 | 1 | 14,60 € | 14,60 € |
| Manguito 160mm | 1 | 3,68 € | 3,68 € |
| Tapón registro 160 | 1 | 8,23 € | 8,23 € |
| Abrazaderas PVC 32mm | 12 | 0,37 € | 4,42 € |
| Reducción PVC 50-40-20 | 2 | 1,48 € | 2,96 € |
| Manguito mixto PVC 40 | 2 | 1,48 € | 2,96 € |
| Tapón rosca 40 PVC | 2 | 2,10 € | 4,20 € |
| Reducción PVC 90-75-40 | 2 | 4,88 € | 9,75 € |

| | | | |
|-------------------|----|------------|----------|
| Pasahilos estanco | 12 | 0,59 € | 7,11 € |
| Tornillería varia | 1 | 10,00 € | 10,00 € |
| | | | |
| | | Total sec. | 118,92 € |
| | | | |
| Varios | | | |
| Analizador lógico | 1 | 15,98 € | 15,98 € |
| Adhesivo N30 PVC | 2 | 2,01 € | 4,03 € |
| Estaño de soldar | 1 | 1,51 € | 1,51 € |
| pinzas RJ45 | 1 | 7,25 € | 7,25 € |
| | | | |
| | | Total sec. | 28,77 € |
| | | | |

Total: 867,11 €

Tabla 13. Presupuesto y adquisiciones

5.3. Casco resistente

La base donde se apoyan todos los elementos del ROV es su casco resistente y, por tanto, se decidió empezar la construcción en esta parte. En la fase de diseño ya se había determinado la eslora, pero para seccionar la longitud correcta del tubo de 160mm se tuvo que calcular la distancia a la que el tubo entra en el manguito en el cual va encolado el tapón para cumplir así con la eslora de diseño. Una vez determinada esta longitud, se procedió a realizar este corte. Inmediatamente después se preparó la superficie mediante un lijado fino, con el fin de asegurar el correcto agarre del adhesivo y se encoló el manguito. Una vez secado el manguito, se realizó la misma labor con el tapón de rosca, dejando finalizada la sección de popa del casco resistente.



Fig. 26. Prueba de inundación del casco resistente

En la zona de proa del casco resistente se colocó una anilla con el fin de obtener una superficie de soporte para la semiesfera. Esta anilla se diseñó mediante ordenador y posteriormente se imprimió con una impresora 3D en material PLA. Antes de poder fijar la sección de proa del casco resistente, se debían instalar los elementos de la estructura. Por tanto, para seguir el orden cronológico de la construcción, es recomendable en este punto dirigirse a la «Sección 5.4. Construcción de la estructura». Una vez fijada la estructura se procedió al fijado definitivo de la sección de proa del casco resistente.

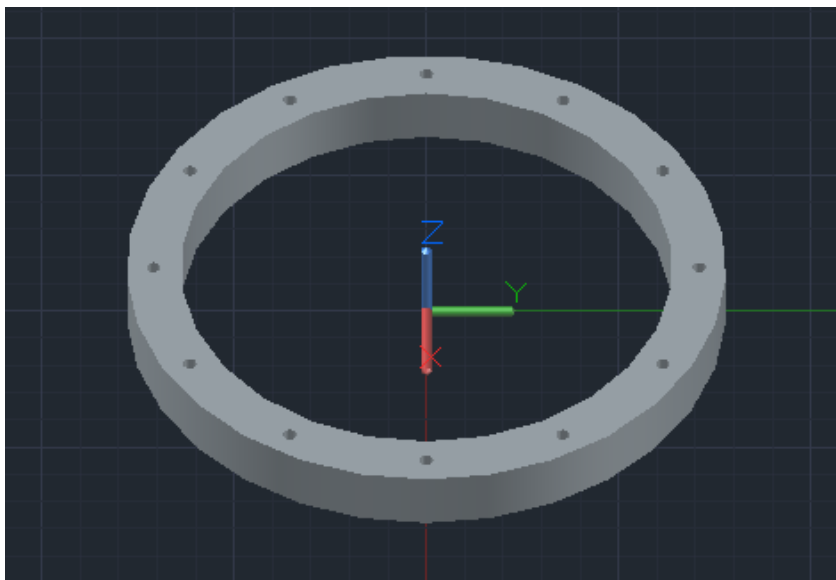


Fig. 27. Diseño de la anilla a imprimir en 3D.



Fig. 28. Fijación de la sección de proa del casco resistente

Una vez que las dos aperturas del casco resistente estuvieron selladas, se determinó que este cumplía con su objetivo de proteger a todos los elementos de su interior. En este elemento se tuvieron muy en cuenta las juntas y cierres, por tanto la semiesfera está dotada de una junta de silicona y pernos para aprisionar la misma y en la sección trasera el tapón con rosca consta de una junta de goma que al roscar el mismo queda aprisionada.

5.4. Estructura

En esta sección se determina cómo se realizaron las piezas que conforman la estructura del ROV y el montaje de las mismas.

Se partió de una plancha de PVC amarillo de 4mm de espesor y en ella se plasmaron las dos piezas estructurales necesarias.

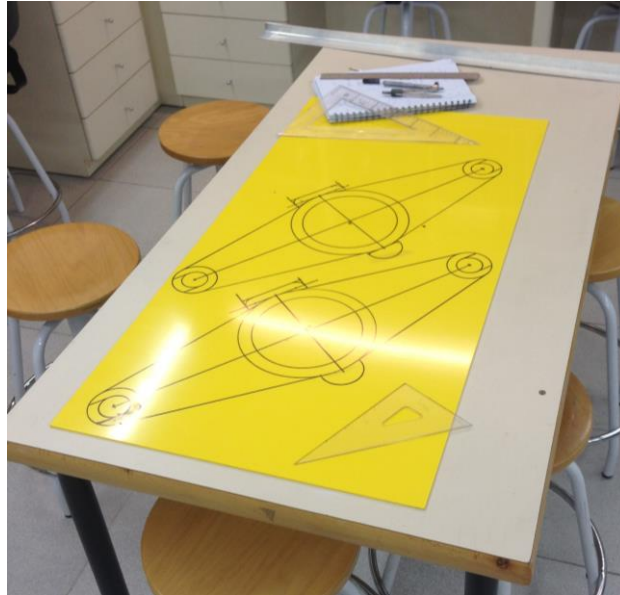


Fig. 29. Marcado de los elementos estructurales

Finalizado el paso anterior, mediante una sierra de hoja se realizaron los cortes necesarios y posteriormente se perforaron los orificios marcados mediante un taladro.

Para ganar resistencia y adherencia de la estructura al casco resistente, se cortaron tres anillas del tamaño del casco resistente que se adhirieron a la parte central de la estructura, obteniendo un espesor de 12mm en la zona central de las piezas estructurales.

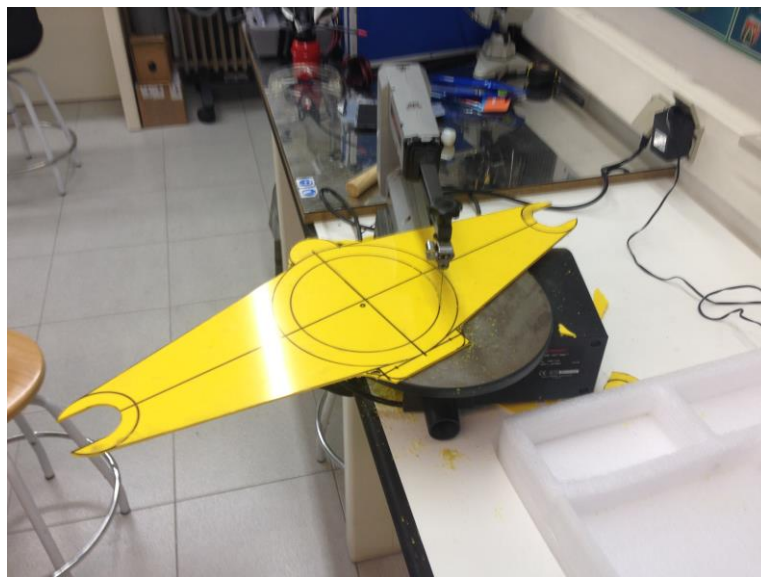


Fig. 30. Corte de los elementos estructurales.

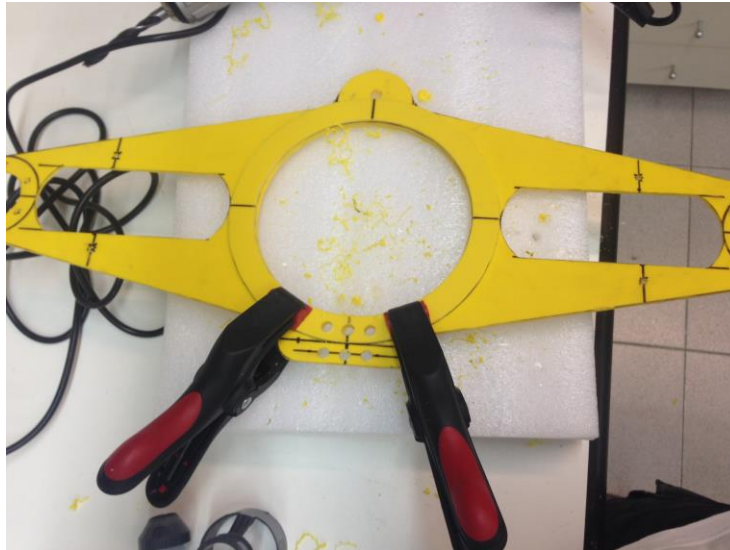


Fig. 31. Adhesión de las anillas para aumentar espesor y resistencia.

Conformadas ya las piezas necesarias para la construcción de la estructura se procedió a la adhesión de estas al casco resistente en las posiciones fijadas por el diseño. El material para realizar tal fin es un adhesivo para PVC. Teniendo en cuenta que los dos elementos están conformados por el mismo material, no supone un problema: el adhesivo funde los dos materiales y crea una unión sólida entre ellos.

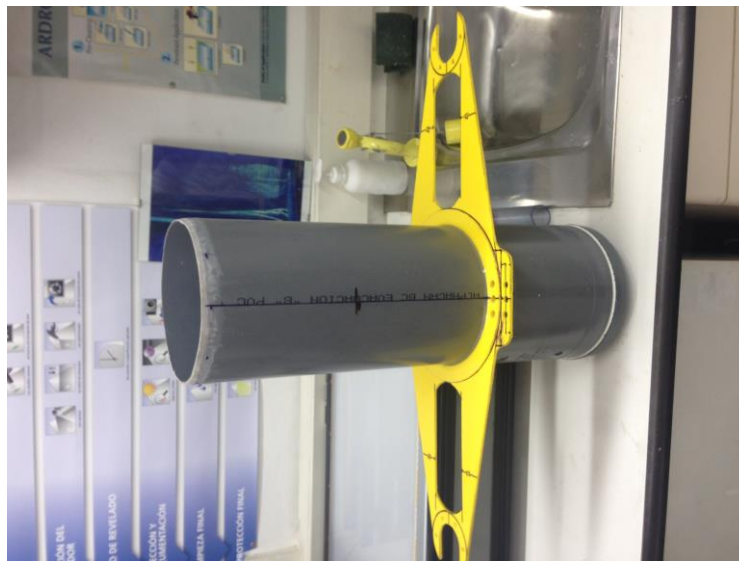


Fig. 32. Adhesión de la estructura al casco resistente.

Una vez adheridas las piezas estructurales, tal y como se describe en la sección 5.3, se procedió a la fijación de la sección de proa del casco resistente (anilla y semiesfera).

5.5. Propulsores

En esta sección debemos diferenciar entre los dos tipos de propulsores que se construyeron para el sumergible. Cada uno está reflejado en una de las dos secciones siguientes.

5.5.1. Propulsores horizontales

Los propulsores horizontales, encargados de la navegación en el plano horizontal, fueron ensamblados como se indica a continuación.

El cuerpo central de los propulsores está conformado por un tubo de PVC transparente, por tanto el primer paso consistía en cortar con la longitud necesaria dos secciones de un tubo de PVC. Posteriormente, para ajustar el alojamiento de los motores DC, se torneó el interior de la sección de proa de estos tubos.



Fig. 33. Presentación de los elementos de los propulsores horizontales.

Para implementar los cierres de proa de los propulsores se utilizó un manguito de PVC con la parte exterior roscada en la que se introduciría un tapón, confiriéndole así la capacidad de inspección o reparación del eje y del motor DC. Estos manguitos tuvieron que ser adaptados para posibilitar la extracción del motor DC.



Fig. 34. Manguitos de la sección de proa y su adaptación.

En la sección de popa el cierre está conformado por varias piezas, descritas por orden de proa a popa a continuación:

- Tobera: La tobera se construyó a partir de una reducción cónica de PVC modificada para tal fin. Para conseguirlo, se le tallaron unas ventanas en la sección inclinada y se pulió la superficie de entrada, con el fin de garantizar un fluido lo menos turbulento posible hacia la hélice.



Fig. 35. Tallado de las toberas

- Cono: A continuación de las toberas se encuentran los conos para reducir la sección del propulsor antes de llegar a la hélice. Estas piezas, igual que las toberas, están conformadas a partir de una reducción cónica modificada de 40mm a 20mm.
- Cierre del eje: Finalmente entre el cono y el eje se colocaron unos discos impresos en 3D, los cuales atraviesa la bocina para garantizar el correcto centrado del eje y todos sus componentes.

En el interior del propulsor se instalaron los siguientes elementos en orden de proa a popa:

- Cable de alimentación: El cable se introduce en el propulsor a través de un pasacables IP68 instalado en el tapón de proa.
- Motor DC: el motor DC va ajustado en el cuerpo del propulsor, uniéndose el eje mediante un conector que adapta el tamaño del eje del motor al del eje principal.



Fig. 36. Motor, eje, bocina y hélice.

- Eje y bocina: El eje con diámetro de 4mm atraviesa la bocina de 6 mm de diámetro. El espacio entre las dos va relleno de grasa para reducir la fricción y garantizar la estanqueidad del conjunto. Al inicio de la bocina, se colocó un disco impreso en 3D que realiza la función de chumacera de apoyo, garantizando así el centrado correcto del eje.
- Lastre: Entre la chumacera de apoyo y el final del propulsor se utilizó este espacio para la agregación de lastre, ayudando también a garantizar la estanqueidad del propulsor. Para formalizar este lastre se rellenoó este espacio con una colada de cemento blanco y bolas de acero. Se evitó usar lastre de plomo por motivos medioambientales.



Fig. 37. Ajuste del relleno de lastre.

El sistema de sujeción a la estructura del sumergible: con el objetivo de fijar debidamente los propulsores a la estructura del ROV se diseñaron dos anillas perforadas que posteriormente se imprimieron en 3D.



Fig. 38. Anilla de sujeción impresa en 3D.

Estas anillas se montaron en principio y final de la sección central del propulsor como puede observarse en la imagen a continuación del conjunto de piezas impresas en 3D.

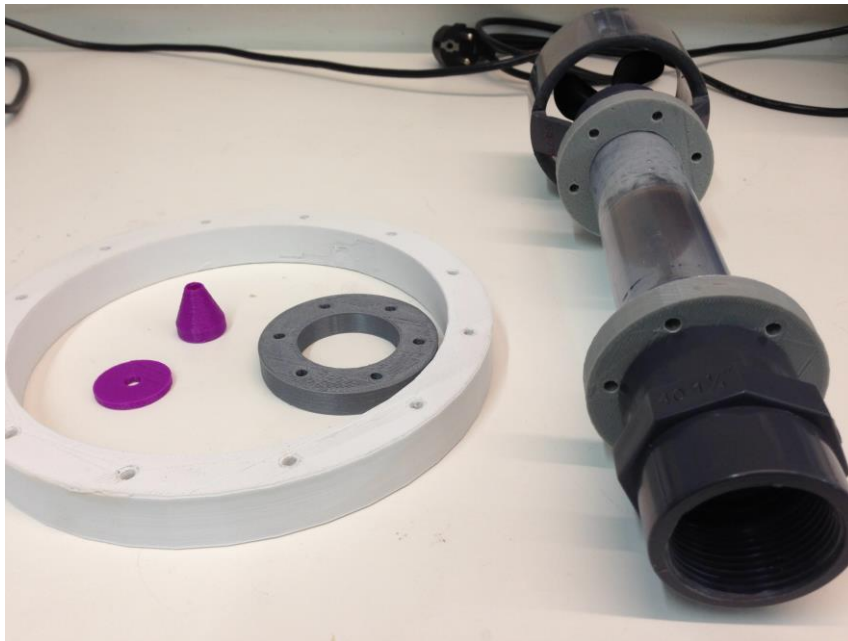


Fig. 39. Vista de un propulsor horizontal y otros componentes impresos en 3D.

Una vez ensamblados todos los componentes y fijados, se procedió a la instalación del conjunto del propulsor en la estructura. Esta fijación se realizó mediante pernos, tuercas y arandelas, concretamente ocho pernos en cada uno de los propulsores, cuatro en la sección delantera y otros cuatro en la sección trasera.



Fig. 40. Sistema de fijación de los propulsores horizontales a la estructura.

5.5.2. Propulsores verticales

El vehículo submarino cuenta con cuatro propulsores verticales con el fin de garantizar la estabilidad de este y la inmersión del mismo. El proceso de montaje es similar al descrito anteriormente para los propulsores horizontales, pero con algunas diferencias; por lo que resulta relevante describir el proceso de nuevo.

El cuerpo central de estos propulsores está conformado por un tubo de PVC translucido con un diámetro exterior de 32mm.

La sección superior del propulsor se conforma igual que en los propulsores descritos anteriormente, con un manguito con rosca interior en el cual se introduce un tapón que hace la función de registro en caso de reparación o sustitución del eje o del motor DC. Este tapón es atravesado por un pasacables IP68 para garantizar la estanqueidad del cable de alimentación.

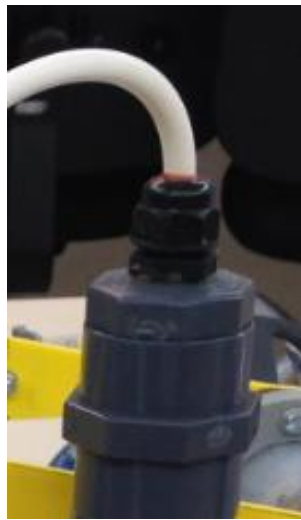


Fig. 41. Vista del pasacables instalado y con el cable de alimentación.

En la sección inferior de los propulsores se monta una tobera, mecanizada manualmente; un cono conformado a partir de una reducción de PVC de 32 a 20, posterior a esta reducción se coloca otro cono, en este caso impreso en 3D para proporcionar un flujo con las mínimas perturbaciones, ya que los propulsores verticales por defecto impulsan inversamente.



Fig. 42. Sección inferior de un propulsor vertical.

En el interior se colocan los elementos igual que en los propulsores horizontales con la única diferencia de que en este caso el lastre se conforma por una mezcla de silicona y bolas de acero, sustituyendo el cemento blanco utilizado en el caso anterior.



Fig. 43. Elementos mecánicos.



Fig. 44. Chumaceras de apoyo interiores.



Fig. 45. Soldadura de las conexiones eléctricas al motor DC.



Fig. 46. Lastre medido para cada uno de los propulsores

Como ya se ha mencionado anteriormente, estos propulsores están diseñados para impulsar inversamente. Teniendo en cuenta este detalle, la mejor forma de proporcionar el máximo rendimiento de impulso es colocando las hélices de forma inversa a su colocación natural. Con el fin de poder obtener esta forma de montaje, se tuvieron que taladrar y roscar nuevos orificios para pasar el eje por el lado opuesto al predefinido de fábrica, proporcionando así el mayor rendimiento impulsando a la inversa.



Fig. 47. Hélice en proceso de remodelación.

Una vez finalizado el ensamblado de los propulsores se procedió al montaje del sistema de fijación de los mismos. Estos se fijan mediante unos soportes fijados a la estructura que los sujetan a presión.

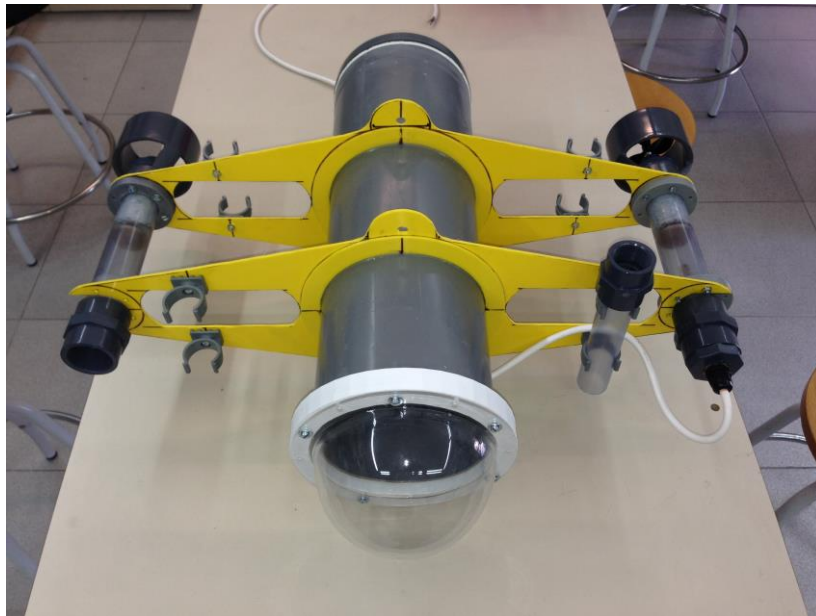


Fig. 48. Soportes de fijación de los propulsores verticales.

Instalados los soportes, se procedió a la fijación por presión de los cuatro propulsores verticales, completándose así esta fase del ensamblaje. Antes de la fijación definitiva se comprobó el correcto funcionamiento de cada uno de ellos realizando una sencilla prueba como puede verse a continuación.



Fig. 49. Prueba de un propulsor vertical.

5.6. Control e inspección.

En esta sección se incluyen todos los elementos físicos que forman parte del sistema de control e inspección, todos los componentes electrónicos. En la sección de diseño se han descrito cada uno de los componentes que forman el sistema, por tanto, en este apartado se describirá el proceso de ensamblaje sin adentrarse mucho en las características de los componentes.

Siendo el sistema de iluminación el único que se encuentra en el exterior del casco resistente, se procedió al montaje de estos, antes de adentrarse en el interior del casco resistente. Antes de la instalación se comprobó el correcto funcionamiento de los mismos.



Fig. 50. Comprobación del correcto funcionamiento del sistema de iluminación.

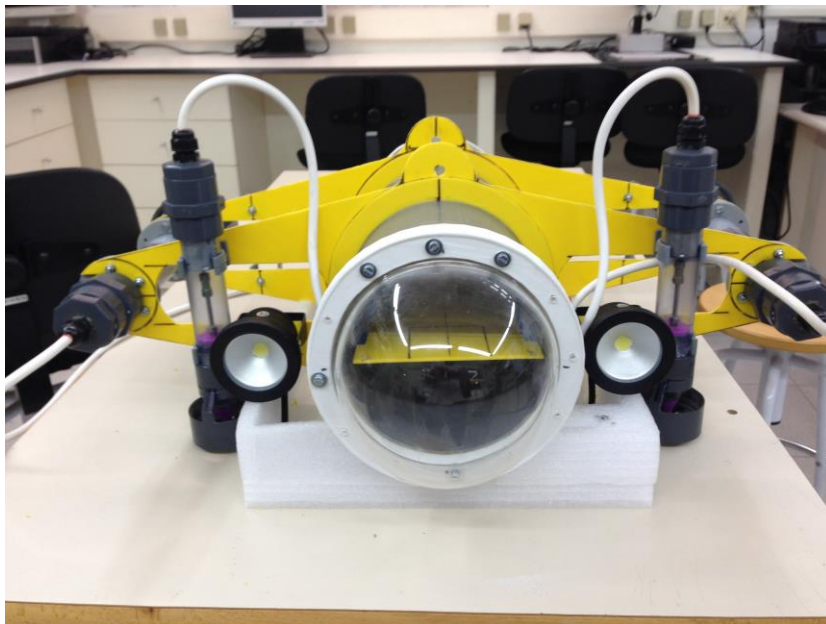


Fig. 51. Vista general del sistema de iluminación instalado y la posición de la plataforma interior.

Todos los componentes electrónicos van en el interior del casco resistente, excepto el sistema de iluminación. Con el fin de poder instalarlos y facilitar el acceso a estos se determinó que debían ir montado todo sobre una bandeja extraíble del casco resistente por la compuerta trasera.

Por tanto, el primer paso comprendió la toma de medidas sobre el tamaño de esta bandeja. Una vez determinadas las medidas, se procedió a realizar los cortes en la plancha de PVC de 4mm para su modelado final.

Finalizado el corte, se distribuyeron todos los componentes electrónicos que debían ir montados a bordo y se realizaron todas las mecanizaciones necesarias para la correcta fijación de estos.



Fig. 52. Plataforma para la electrónica con el mecanizado para sujetar la videocámara.

Al finalizar toda la mecanización de la plataforma, se inició la instalación de los distintos componentes que esta debía albergar. Se comprobó que las conexiones se habían realizado correctamente en cada paso y que los componentes tenían el funcionamiento acorde con el diseño.

Antes de poder testar la plataforma en el interior del casco resistente se debían fijar los carriles encargados de la sujeción de este. Para ello, se tuvo que marcar la correcta posición de estos y posteriormente adherirlos a las paredes interiores, como puede observarse en la siguiente imagen.



Fig. 53. Carriles de fijación de la plataforma, interior del casco resistente.

El primer paso del montaje de los componentes consistió en instalar la videocámara en el sistema de sujeción diseñado expresamente para ello. En la siguiente imagen puede observarse la primera prueba de montaje de la videocámara en el interior del casco resistente.

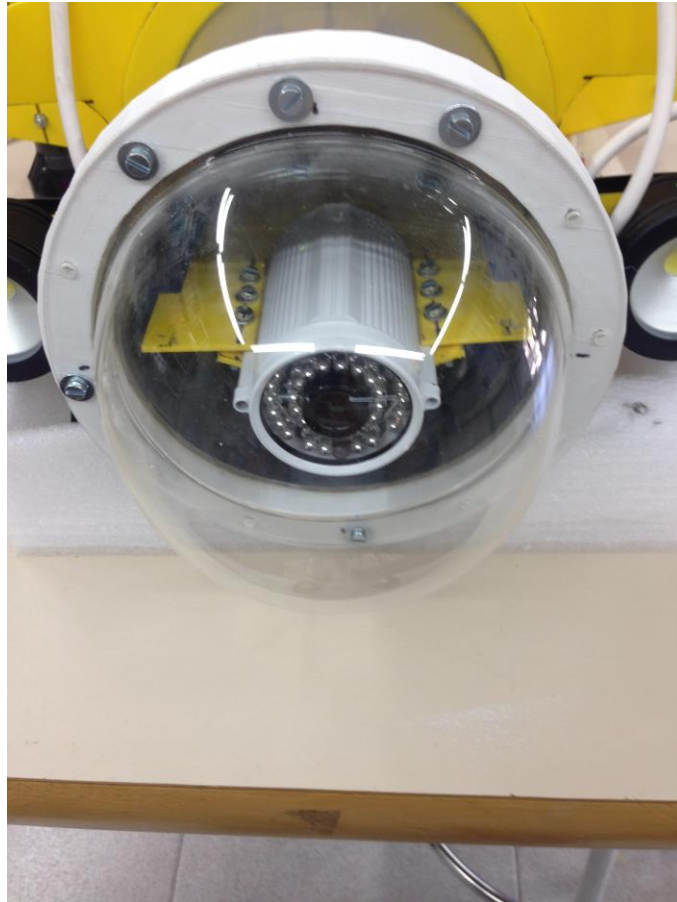


Fig. 54. Videocámara en el interior del casco resistente.

Después de la instalación de la videocámara, se procedió a la instalación de todo el conjunto del suministro eléctrico de potencia, siguiendo el orden del circuito desde que la energía eléctrica entra en el ROV hasta su transformación en energía mecánica.

El primer paso de la energía eléctrica en el interior del sumergible se da a través de los reguladores. Por tanto, se instalaron estos y se comprobó su correcto funcionamiento, ajustándolos a las tensiones requeridas antes de proceder a la conexión con los componentes siguientes, evitando así poder dañar estos componentes.

Una vez instalados los reguladores, ya se podían crear las redes de distribución de energía a los distintos componentes. Antes de proceder al cableado se debían fijar todos ellos a la plataforma.

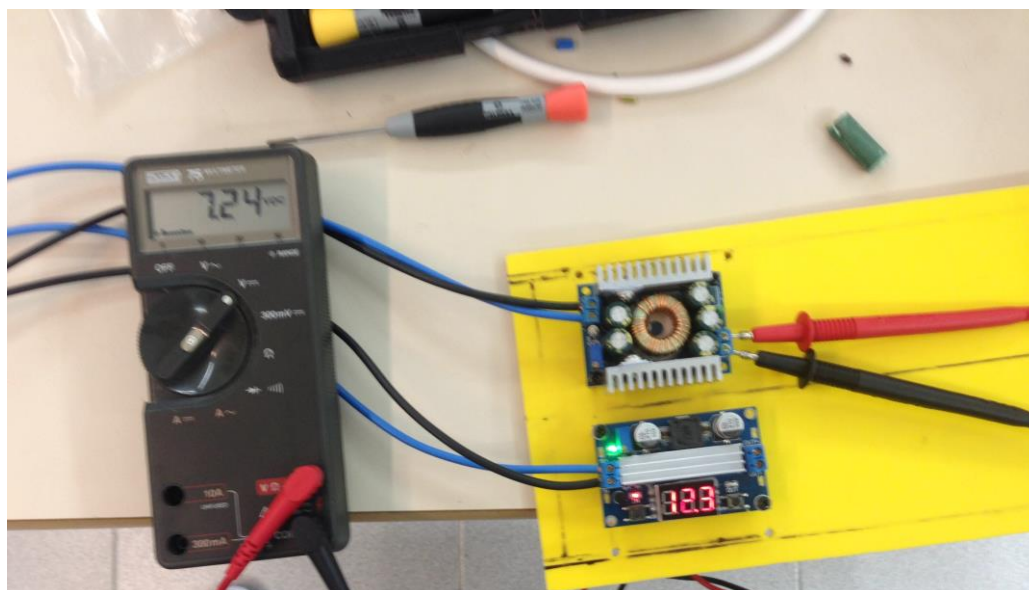


Fig. 55. Configuración de los reguladores de tensión.

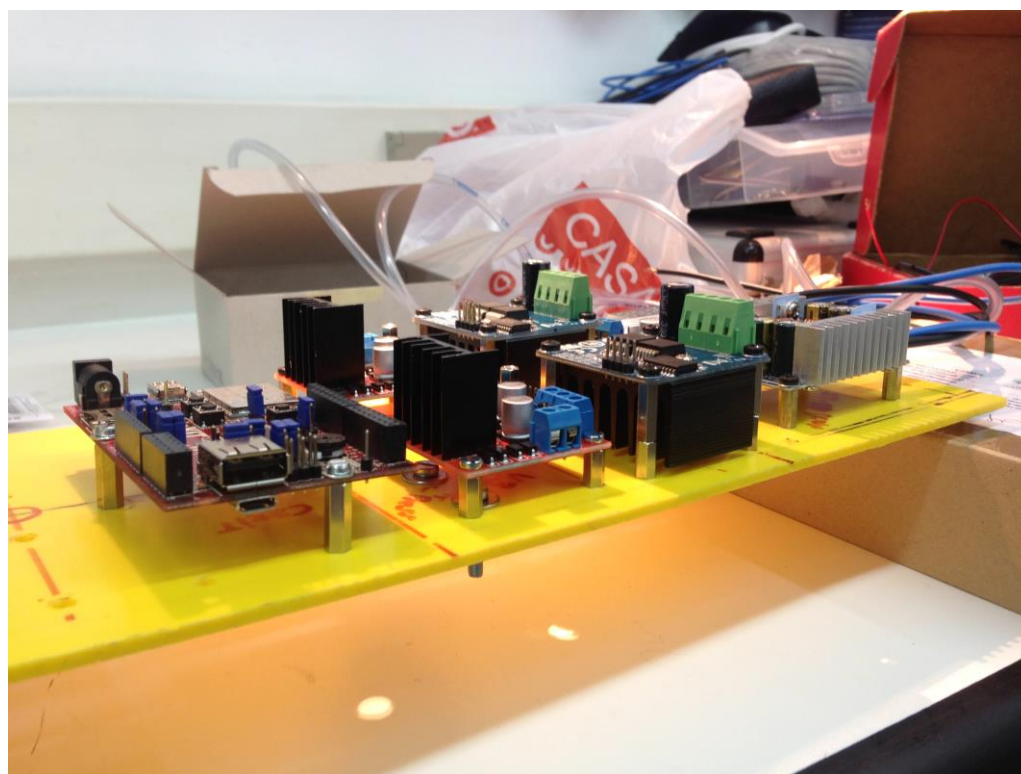


Fig. 56. Fijación de varios componentes electrónicos.

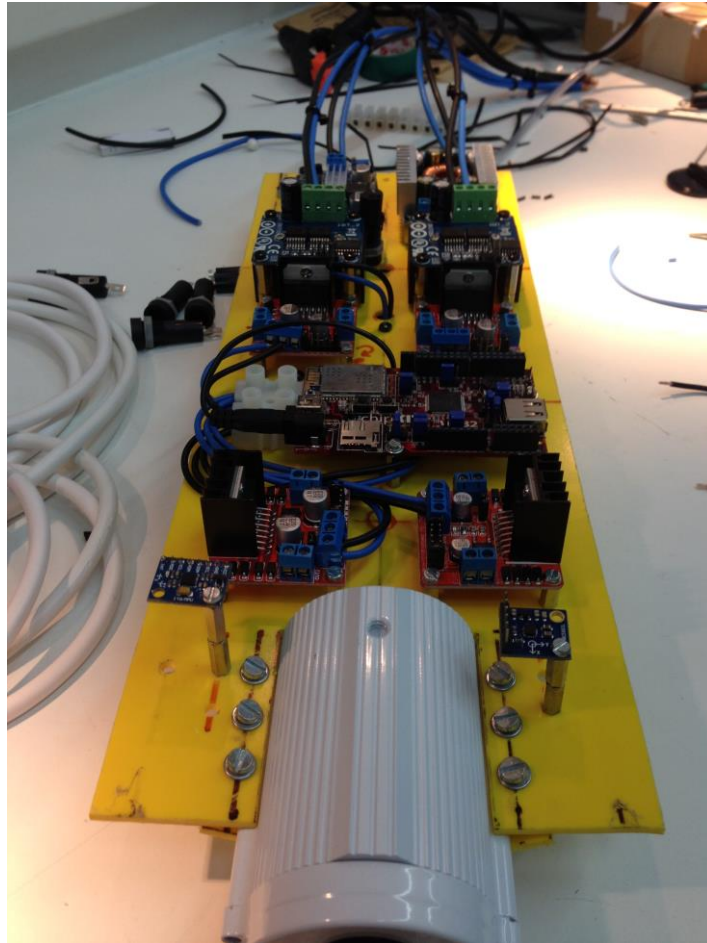


Fig. 57. Cableado de potencia a todos los componentes.

Una vez finalizado el cableado de potencia, se inició la instalación de todo el cableado de control. Este cableado va entre la unidad principal de control y los diferentes componentes de control. Utiliza una tensión de 3,3 V o 5 V dependiendo del componente de destino. Emplea intensidades muy bajas y por tanto se utilizan cables finos con conectores especiales para los pines.

Con el fin de poder suministrar un cable de tensión y otro de masa a cada uno de los componentes, apareció la necesidad de implementar una barra de conexiones con tensiones de 3,3 V, 5 V y masa.

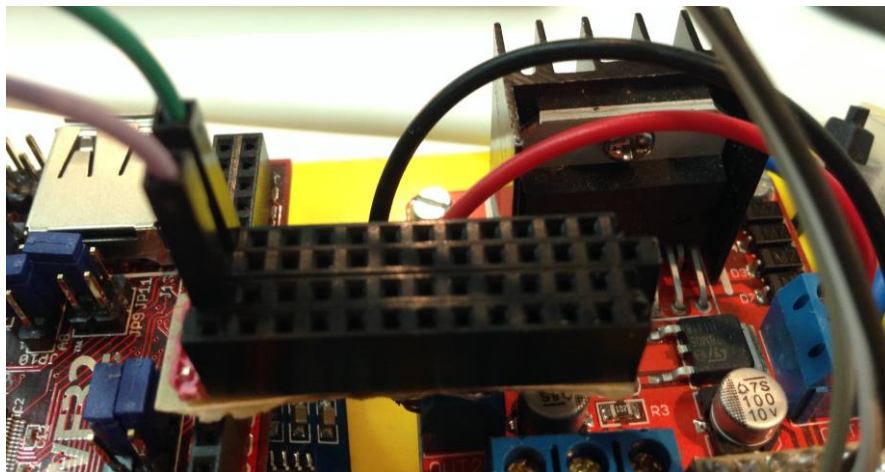


Fig. 58. Barras de alimentación.

A partir de este punto se finalizó el cableado de control, se incluyeron las medidas de seguridad como fusibles o medidores de consumo, para finalizar todas las conexiones de la parte interior del vehículo. Antes de conectar los cables procedentes del exterior se perforaron los orificios necesarios en la tapa posterior del vehículo y se instalaron los pasa hilos necesarios para garantizar la estanqueidad de estos.

Una vez completada la tapa, fijados y sellados los pasa hilos, se pasaron todos los conductos necesarios y se realizaron las conexiones en las posiciones correspondientes.

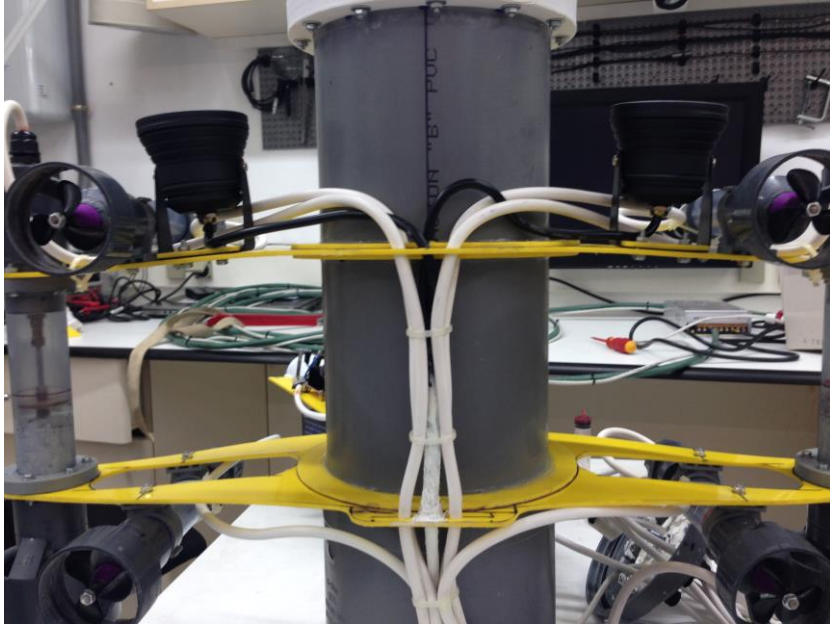


Fig. 59. Cableado exterior en la parte inferior del vehículo.



Fig. 60. Vista final a falta del lastre.

5.7. Lastre

Una vez instalados todos los componentes, se tuvo que determinar el peso y el desplazamiento del vehículo para conseguir igualar al máximo estas dos cifras con el fin de obtener una flotabilidad cerca de la neutralidad. A continuación se incluye una tabla con el cálculo de todos estos datos.

| Elemento | Longitud [mm] | Diámetro [mm] | Volumen | Volumen*Unidades [mm^3] |
|--------------------------|---------------|---------------|-------------|-------------------------|
| Casco resistente | 500,00 | 160,00 | 10053096,49 | 10053096,49 |
| Semiesfera | | 160,00 | 1072330,29 | 1072330,29 |
| Propulsores Horizontales | 285,00 | 42,50 | 404308,25 | 808616,4966 |
| Propulsores Verticales | 210,00 | 34,50 | 196312,23 | 785248,9377 |
| Focos | 60,00 | 60,00 | 169646,00 | 339292,0066 |

| | | | | |
|---------------|-------------|------|--------|-----|
| Volumen Total | 13058584,22 | mm^3 | 0,0131 | m^3 |
| | | | 13,06 | L |

| | | |
|----------------|-------|----|
| Desplazamiento | | |
| Agua dulce | 13,06 | Kg |
| Mar | 13,39 | Kg |

| | | |
|-----------------|-----|----|
| Peso sin lastre | 8,7 | Kg |
|-----------------|-----|----|

| | | |
|------------------|------|----|
| Lastre necesario | | |
| Agua dulce | 4,36 | kg |
| Mar | 4,69 | kg |

Tabla 14. Cálculo del lastre necesario.

Debido a la diferencia de densidad entre el agua dulce y el agua de mar obtenemos una diferencia de lastre necesario.

El vehículo submarino está diseñado inicialmente para tener flotabilidad positiva y que los propulsores verticales deban funcionar para mantener estable la profundidad. El primer motivo para tomar esta decisión reside en la seguridad, en caso de que se produjera algún fallo el vehículo submarino ascendería a superficie.

Con el fin de obtener la falta de peso se obtuvo una barra maciza de acero en la que se tuvo que obtener la medida necesaria para conseguir el peso deseado. Obtenida la medida que correspondía al peso se procedió al corte de esta. Posteriormente, se mecanizó para conferirle a la pieza un acabado apto para la aplicación de una capa protectora. Esta capa de protección se conformaba de pintura de tonalidad grisácea, de la cual se aplicaron varias capas con el fin de garantizar la ausencia de puntos de corrosión en la pieza.



Fig. 61. Corte de la pieza de lastre.



Fig. 62. Aplicación de protección al lastre.

Completado el tratamiento al lastre se procedió a su fijación. Para realizar tal tarea se fijó en la parte inferior del vehículo submarino, ayudando así a mejorar la estabilidad del mismo, aportando una gran parte del peso en el punto más bajo del conjunto.



Fig. 63. Lastre

5.8. Cable umbilical

El cable umbilical del sumergible está conformado por un cable de alimentación eléctrica con dos conductores de cobre de 6mm² cada uno recubiertos por una manguera y un cable de comunicaciones CAT5, los dos unidos como puede verse a continuación:



Fig. 64. Cable umbilical.

5.9. Software

El software de control se ha implementado mediante la plataforma Labview™ (National Instruments, 2015). Este software de programación visual basada en cajas permite crear este tipo de aplicaciones.

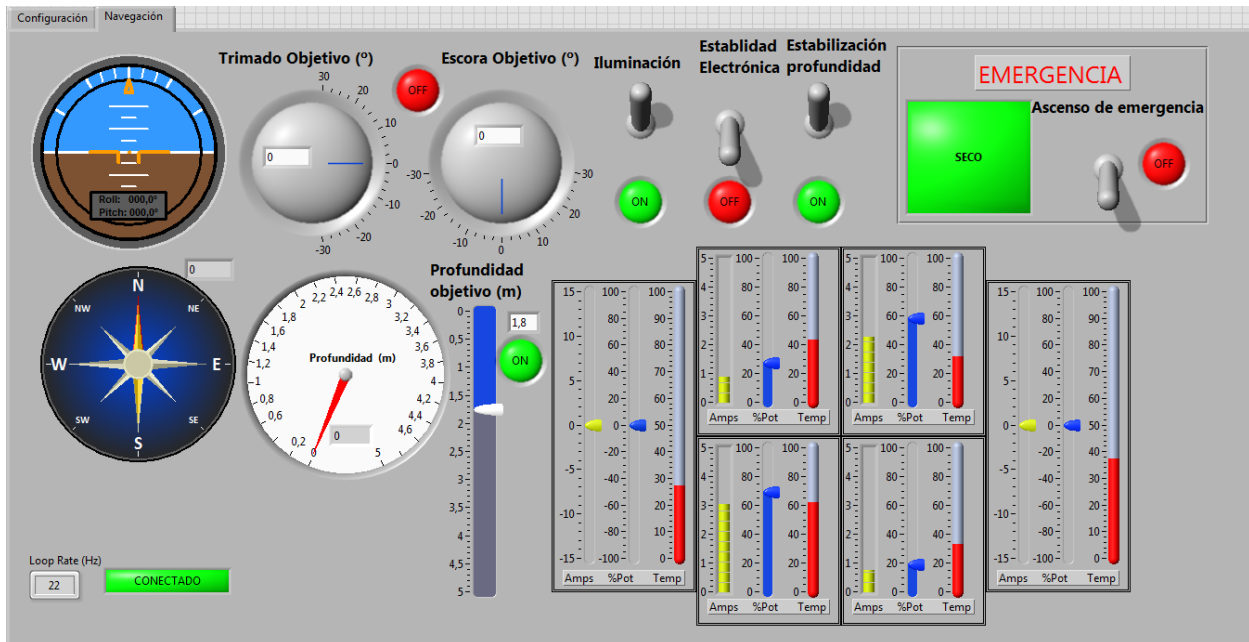


Fig. 65. Vista final del panel frontal del programa de control.

En Labview™ la programación se realiza en dos ventanas distintas pero interconectadas entre ellas. La primera, como puede verse en la imagen anterior, se trata del panel frontal. Como si de un instrumento físico se tratase, este panel emula la parte exterior de un panel de control en este caso. La segunda ventana, siguiendo con las emulaciones, correspondería a todo el cableado y componentes interiores, que el usuario final no ve. Esta pantalla solo la edita el programador y es donde se esconden todas las órdenes que el programa va ejecutando. Todos las descripciones que vienen a continuación contienen secciones de esta sección “escondida” llamada también “diagrama de bloques” por el tipo de programación en bloques que se lleva a cabo en ella.

El vehículo submarino debía contar con una serie de características de control que deben llevarse a cabo mediante programación, a continuación se incluye una lista con estas características:

- Control de los propulsores horizontales.
- Control y regulación de los propulsores verticales.
- Obtención de datos de navegación (rumbo, profundidad, trimado y escora).
- Datos de los propulsores (potencia, consumo y temperatura).
- Control del sistema de iluminación.
- Obtención de imágenes en tiempo real.
- Sistema de control de la estabilidad.
- Sistema de control de la profundidad.

Ante la imposibilidad de plasmar el programa al completo en este documento, a continuación se incluye una captura del programa completo en el cual no es posible identificar cada elemento pero ayuda al lector a hacerse una idea junto con las capturas de secciones en concreto del tamaño de este.

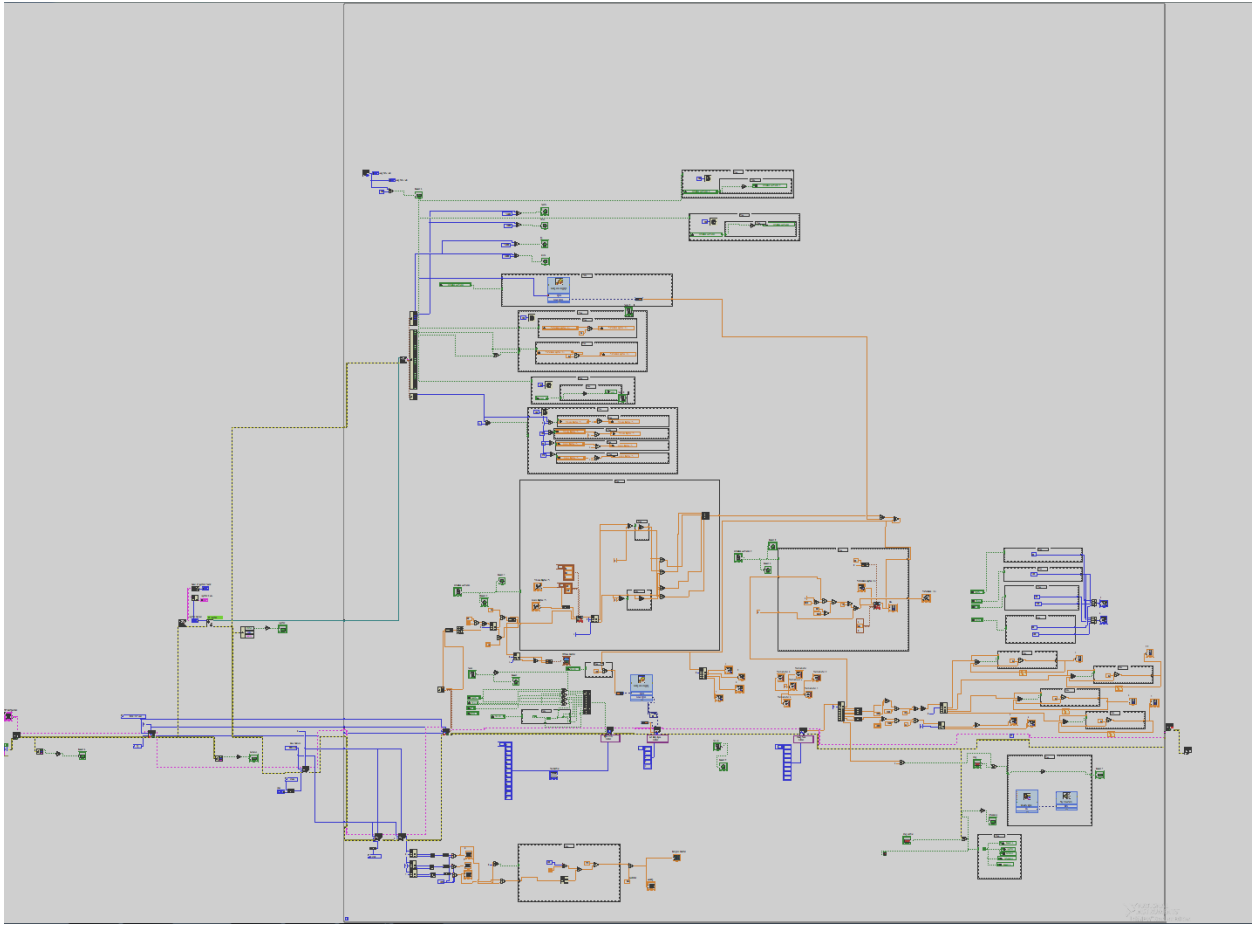


Fig. 66. Vista lejana del diagrama de bloque completo.

Para facilitar el control del operador se instala un *joystick* que obtiene los datos de entrada al programa de parte del piloto. A este controlador se le han agregado las siguientes opciones:

- Control de los propulsores horizontales (babor, estribor, adelante y atrás).
- Regulación del conjunto de los propulsores horizontales (0-100% de potencia)
- Añadir o restar profundidad objetivo.
- Añadir o restar trimado objetivo.
- Añadir o restar escora objetivo.
- Activar o desactivar la iluminación.
- Activar o desactivar el control de profundidad.
- Activar o desactivar el control de estabilidad.

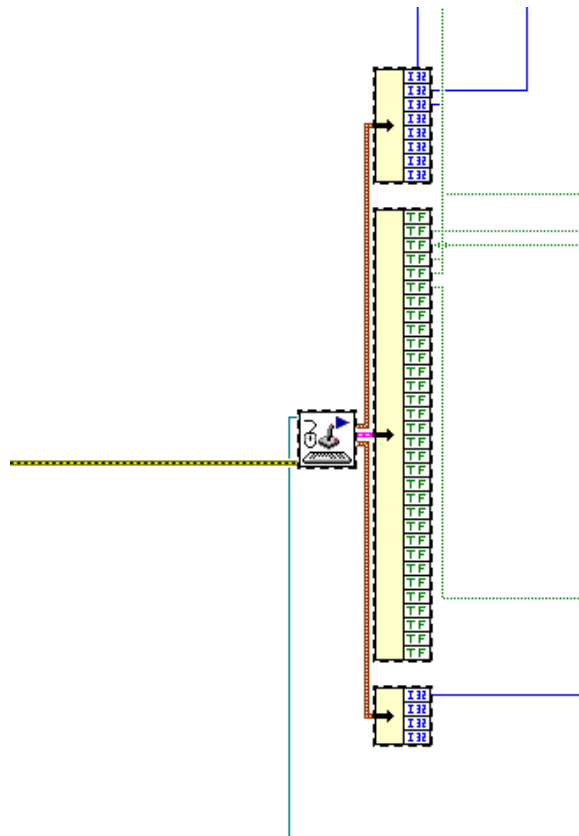


Fig. 67. Lectura de los registros del *joystick*.

Como datos de entrada también se cuenta con los medidores de consumo, el sensor de presión, los termómetros, acelerómetro, compas y sensor de inundación.

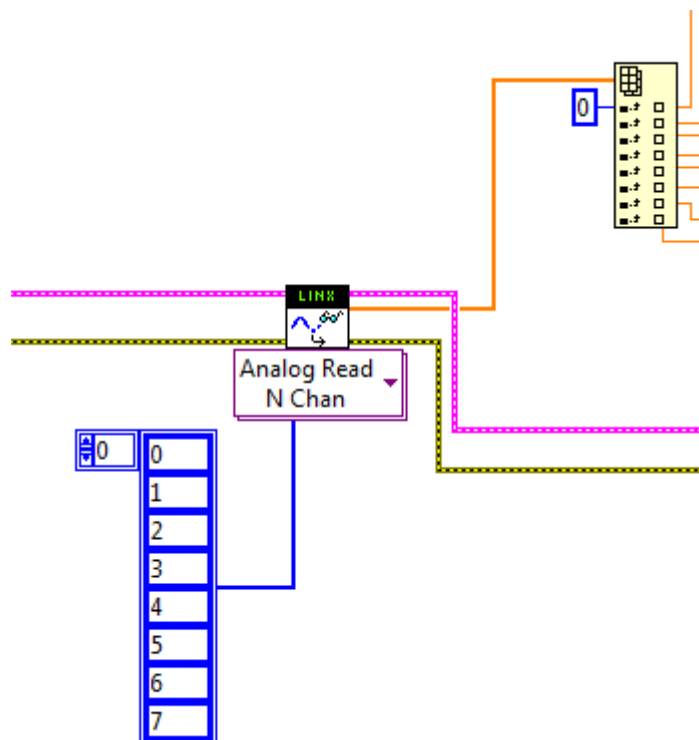


Fig. 68. Obtención de datos de los sensores analógicos.

En la imagen anterior se muestra el software para la lectura de los sensores analógicos. En el caso de los sensores digitales, como son el acelerómetro o la brújula, estos envían sus datos a través del bus I2C. Este protocolo permite conectar varios sensores utilizando solo dos conectores de la unidad central de control, por lo que resulta muy útil a la hora de realizar montajes con muchos sensores.

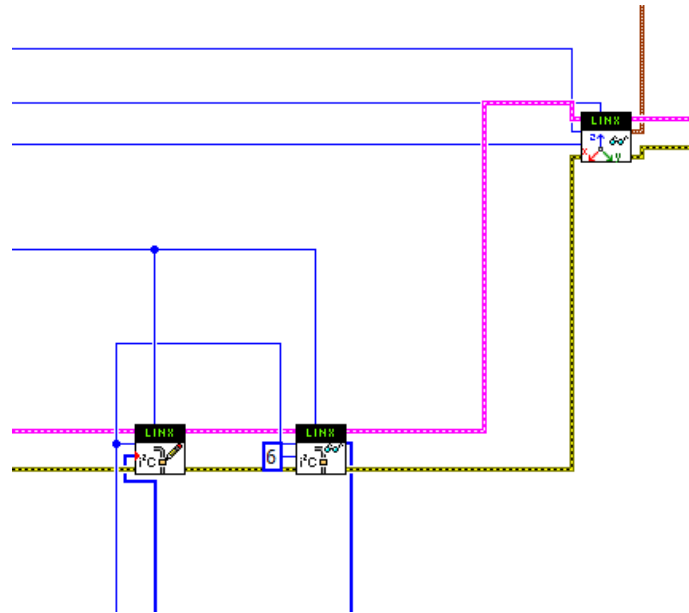


Fig. 69. Lecturas de los registros de los sensores digitales mediante protocolo I2C.

Una vez obtenidos todos los datos, estos deben ser procesados para obtener los valores interpretables por el operador del vehículo submarino.

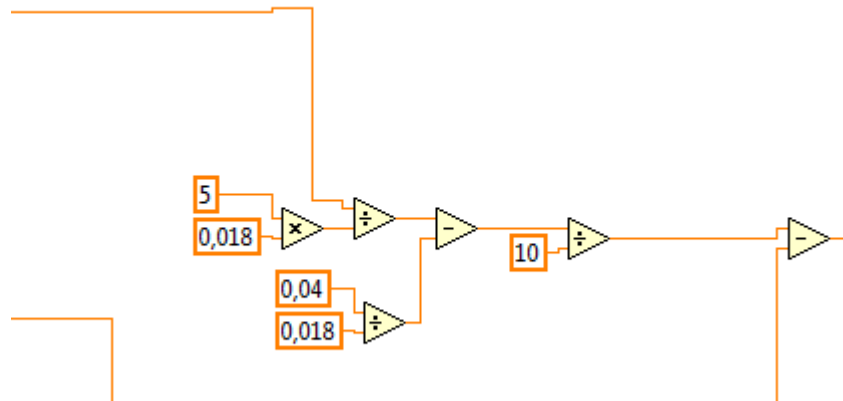


Fig. 70. Conversión de voltaje en profundidad (Sensor de profundidad).

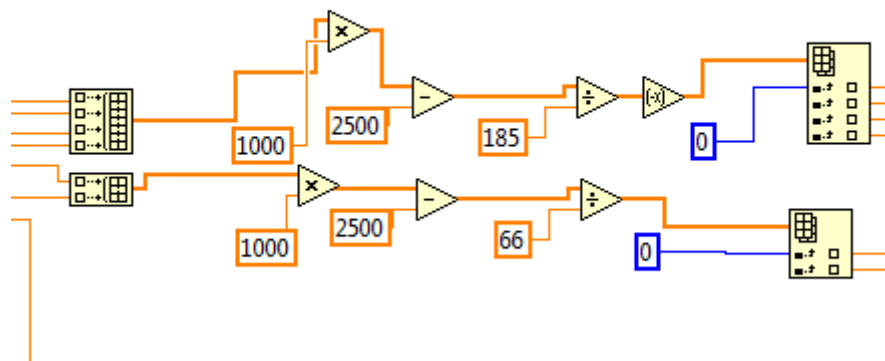


Fig. 71. Conversión de voltaje en amperios (sensores de corriente).

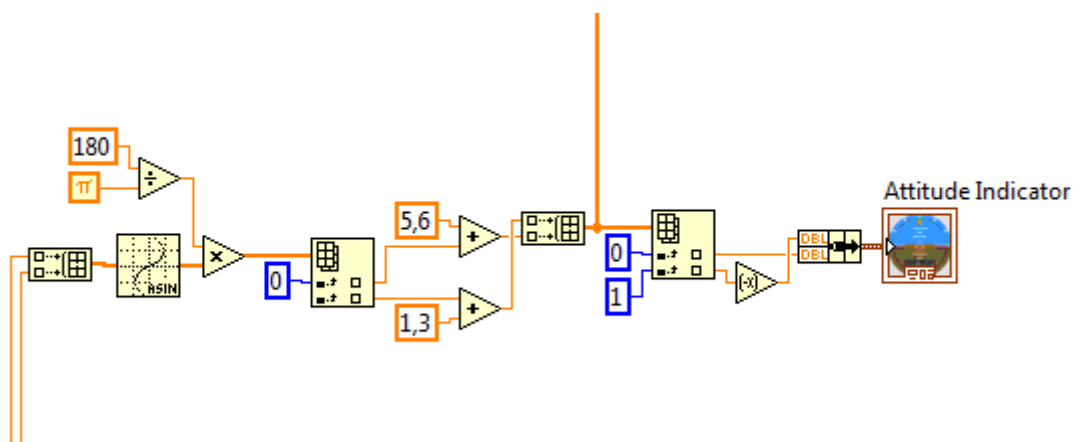


Fig. 72. Conversión de datos del acelerómetro en escora y cabeceo.

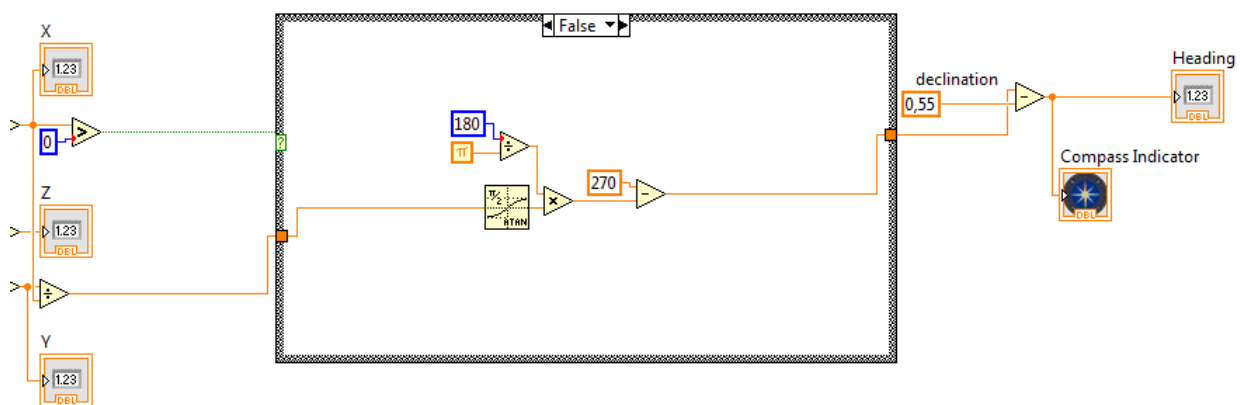


Fig. 73. Conversión de datos del magnetómetro en rumbo.

Finalizada la obtención de todos los datos necesarios para el control del vehículo, se debe poder controlar debidamente los propulsores y demás elementos a bordo del vehículo.

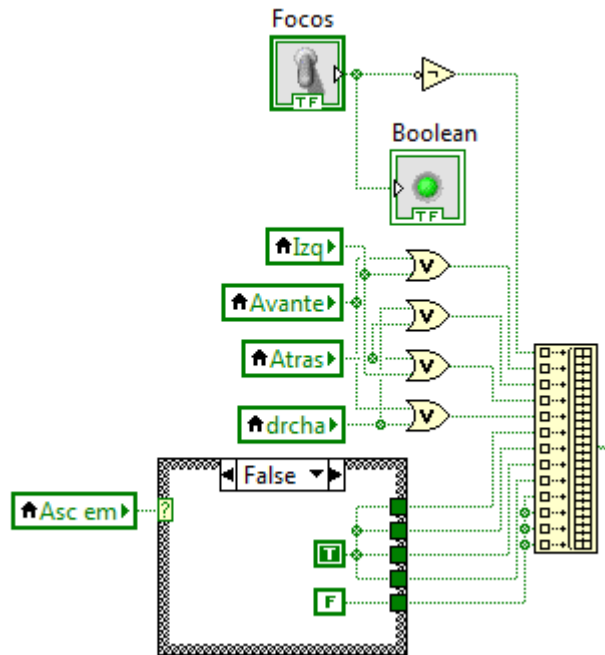


Fig. 74. Ordenes lógicas a canales digitales.

Finalmente, el vehículo submarino cuenta con dos sistemas de automatismo, uno para controlar la estabilidad de este, compensando los errores mediante la regulación de potencia de los motores, y el otro, para el control de la profundidad.

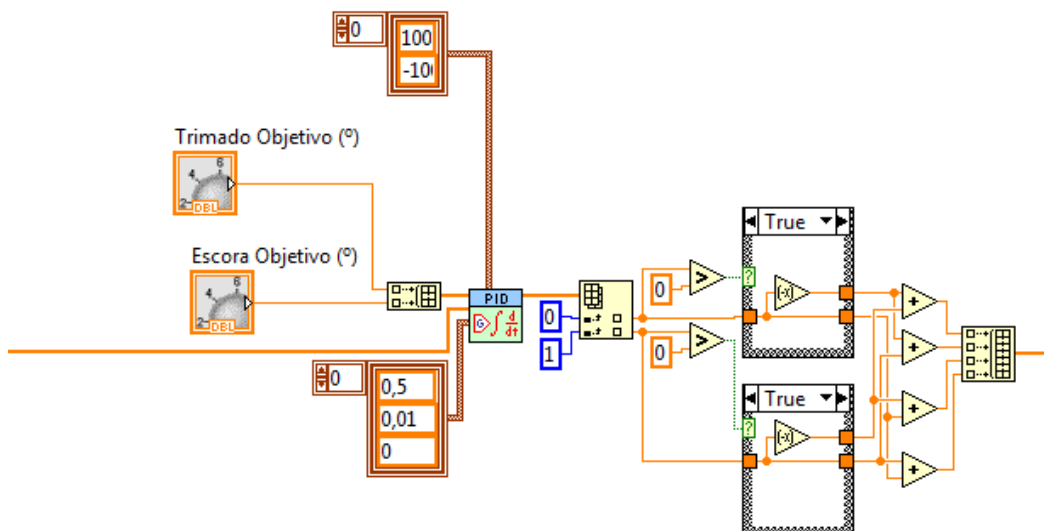


Fig. 75. Sistema de control de estabilidad.

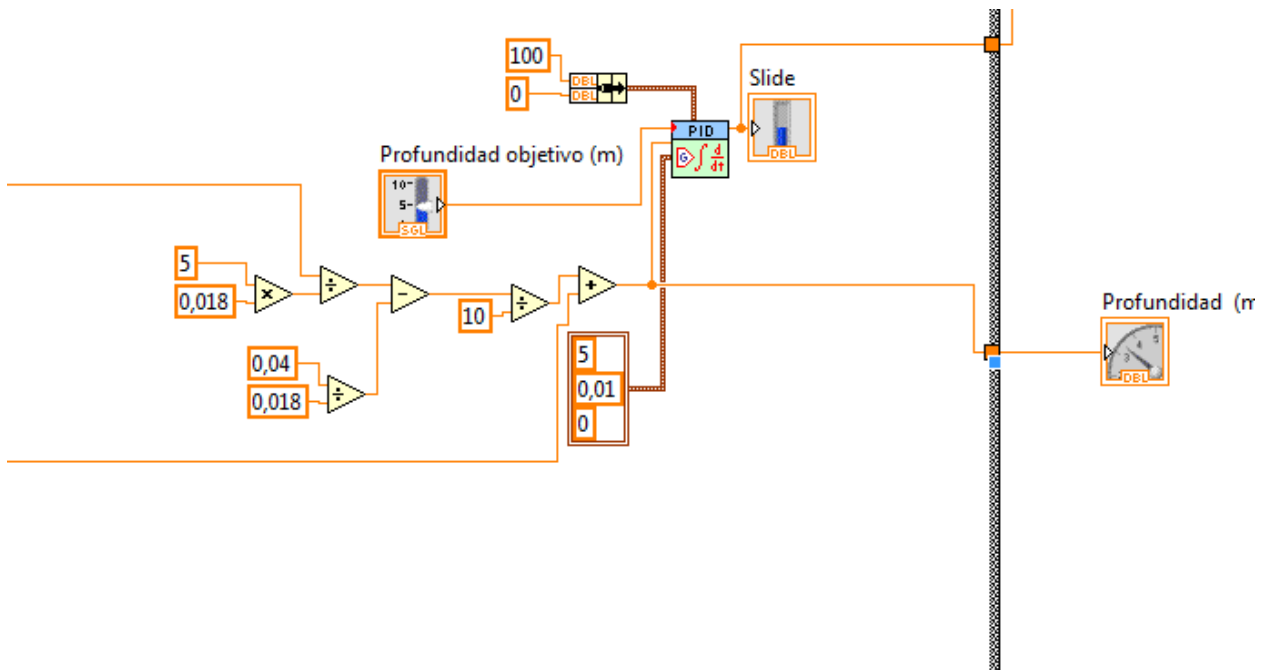


Fig. 76. Sistema de control de profundidad.

La videocámara se visualiza mediante un programa interno propio que lleva incorporado y que se puede ejecutar en cualquier navegador. Este programa permite editar la configuración de la cámara, como pudiera ser el brillo o el contraste de las capturas, así como la resolución de estas.

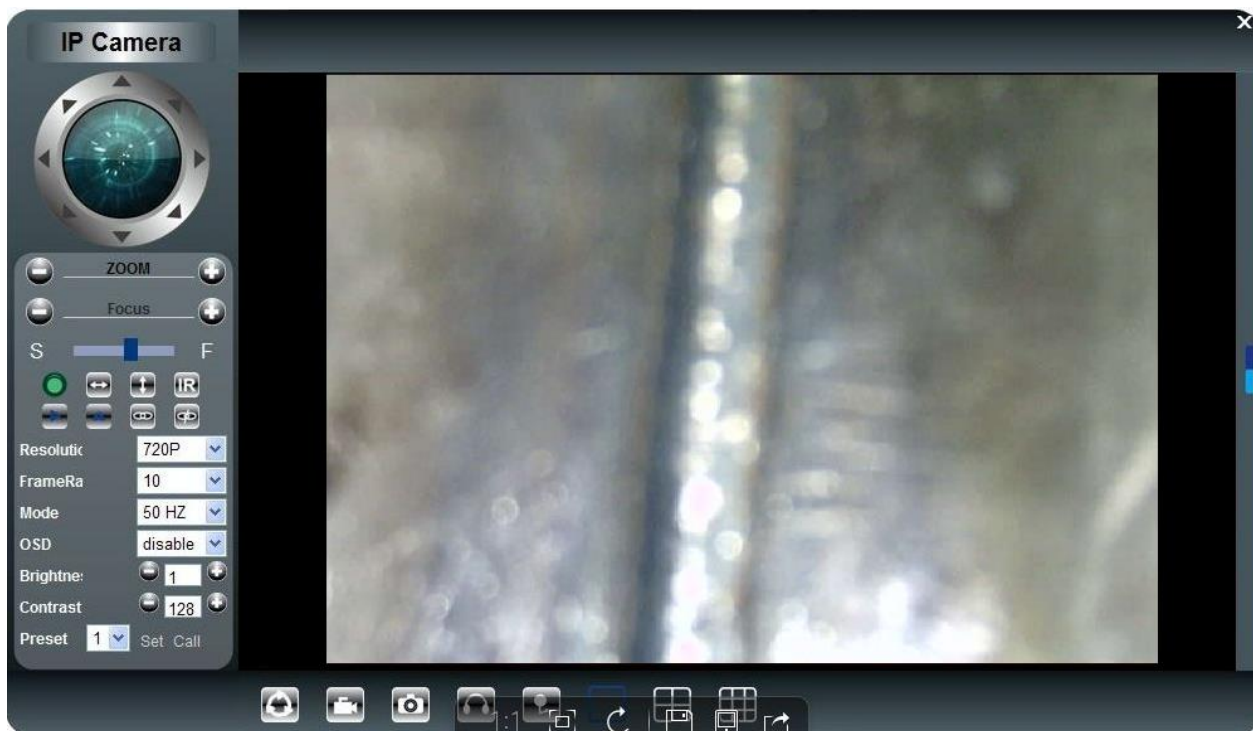


Fig. 77. Captura del programa de visualización de la videocámara.

Capítulo 6. Pruebas de mar

Finalizada la fase de construcción, se inicia el proceso de evaluación y verificación de que todos los componentes tienen un funcionamiento correcto.

Para poder realizar las primeras pruebas de estanqueidad, de navegación y el ajuste del lastre se procedió a instalar una pequeña piscina en el Laboratorio de ensayos no destructivos de la Facultad de Náutica de Barcelona.



Fig. 78. Vehículo preparado para la inmersión mientras se llena la piscina.

Preparada ya la piscina con la profundidad suficiente para que el vehículo navegara, este fue introducido por primera vez en el medio acuático. El resultado de la primera inmersión fue un disparo de la alarma de inundación del casco resistente y, por tanto, se tuvo que abortar la primera navegación.



Fig. 79. Captura del panel de control con el sensor de inundación disparado.

Junto a la alarma visual, como se puede ver en la figura anterior, la alarma de inundación cuenta con una alarma sonora que facilita la máxima velocidad de respuesta entre la inundación y el izado del vehículo.

Con el ROV ya fuera del agua, se comprobó que efectivamente se había producido una pequeña filtración en la parte inferior sin afectar a ningún componente interno. Como solución a esta problemática se hicieron una serie de mejoras en el sistema de cierre como mejorar la junta de goma o recubrir toda la rosca con teflón para garantizar la estanqueidad.

Finalizadas estas mejoras, se volvió a bajar el vehículo al agua. En este caso se mantuvo el vehículo en superficie durante 20 minutos, comprobando así la correcta estanqueidad del casco resistente.

Garantizada la estanquidad del casco resistente, se inició la comprobación de los demás sistemas con el fin de detectar errores de funcionamiento.

- El sensor de profundidad indica correctamente la profundidad con una precisión $\pm 0,1\text{m}$, precisión muy satisfactoria para el uso que se le da en el vehículo.
- Al acelerómetro se le debieron de aplicar unos valores de ajuste para que los valores concordasen cuando el ROV estaba nivelado. Tras este ajuste el sistema funciona correctamente proporcionando información de la escora o del cabeceo.
- La brújula digital tiene algunos problemas debido al campo magnético que genera el numeroso cableado con corriente continua que se encuentra en el interior del casco resistente. Estos afectan a la dirección de la brújula, que proporciona lecturas erróneas en algunos casos.
- El sensor de inundación, como se ha explicado antes, fue el primero en ser comprobado y su respuesta fue muy satisfactoria.

Posteriormente se comprobó que el sistema de iluminación funcionara correctamente y no se obtuvo ningún problema en ese aspecto.

Finalizada la prueba de los sistemas internos, se procedió a la prueba de navegación. En esta debían comprobarse el correcto funcionamiento de los distintos propulsores y cómo estos reaccionaban a los controles.

Al iniciar la prueba de los propulsores horizontales, funcionaron satisfactoriamente hasta que uno de ellos se inundó y como consecuencia de esta inundación se produjo un cortocircuito que provocó la fusión del fusible de ese motor en concreto.

Se tuvo que abortar la prueba debido a este motivo y se procedió a la reparación del propulsor y a la sustitución del fusible dañado. Ningún otro componente sufrió daño alguno. Con esta avería se pudo determinar que los sistemas de protección eléctricos que se instalaron funcionan correctamente y cumplen con su cometido de proteger al resto de componentes susceptibles de ser dañados.

Finalizado todo el proceso, se inició la siguiente prueba de navegación. Esta vez, los sistemas funcionaron correctamente y el sumergible pudo realizar varias maniobras de navegación en la piscina, con unos resultados más satisfactorios de lo esperado.

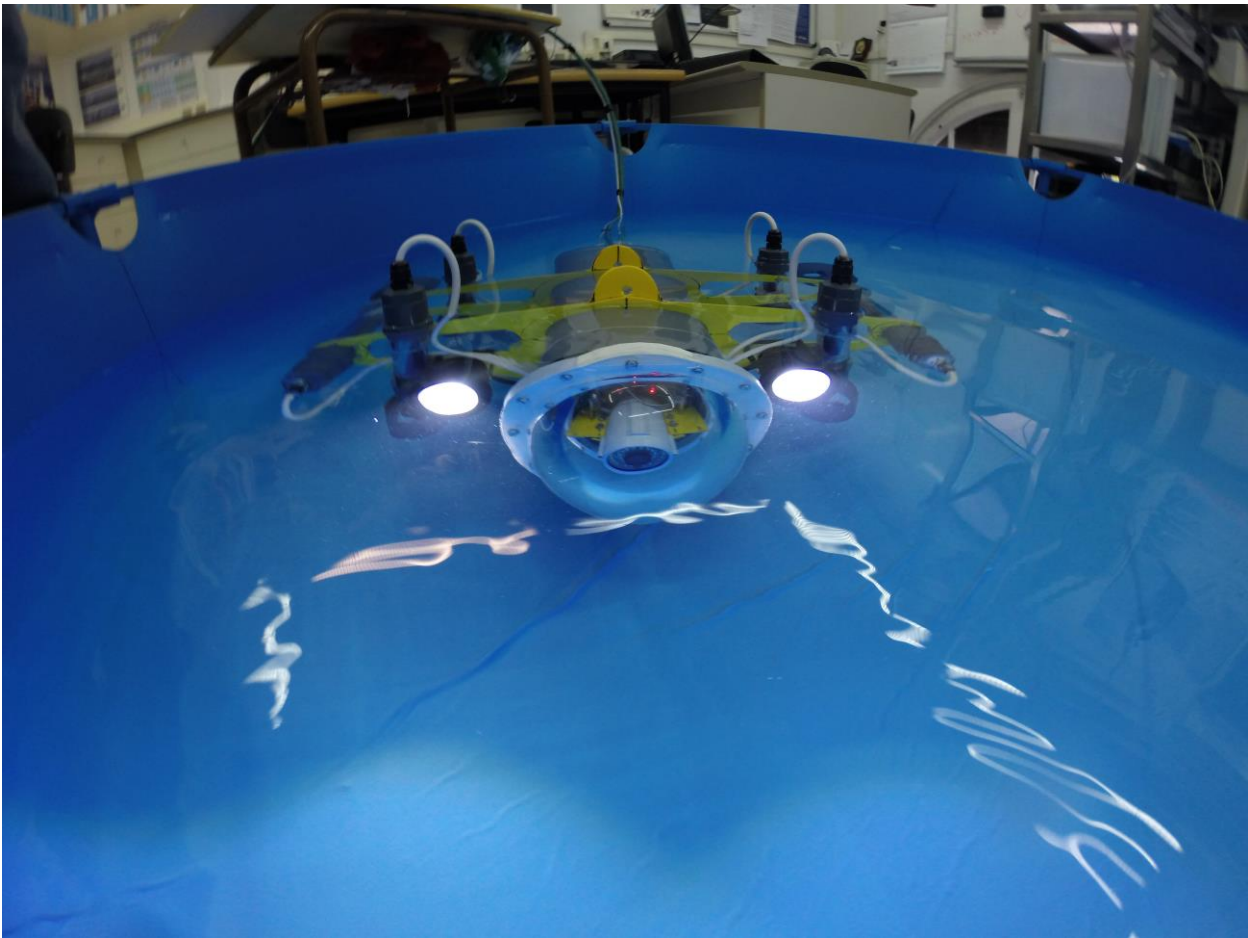


Fig. 80. Sumergible durante las pruebas de navegación.

Cuando el sistema de propulsión horizontal estuvo comprobado y su funcionamiento era correcto, se pasó a la comprobación del sistema de inmersión.

En la piscina provisional no había mucha profundidad, pero sí suficiente para que se pudiera sumergir el vehículo entero. Al realizar la primera prueba apareció el problema de que se seguía teniendo demasiada flotabilidad positiva y los propulsores no eran capaces de hundir el vehículo. Con el fin de aproximarse a una flotabilidad más neutra se añadió lastre hasta conseguir que estos tuvieran la capacidad de hundir el vehículo.

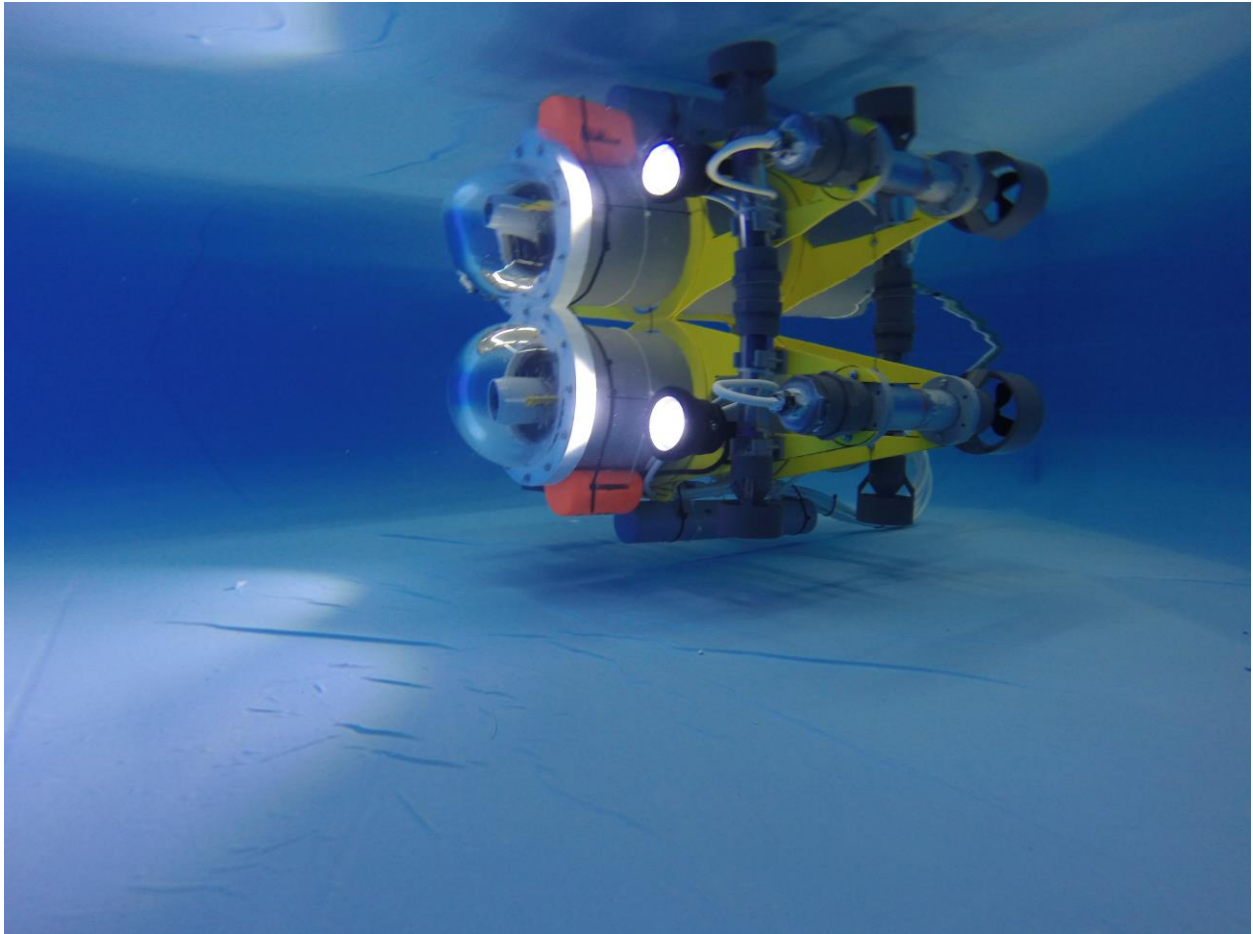


Fig. 81. Sumergible con lastre ajustado.

Llegados a este punto en el que los sistemas de navegación están comprobados y su funcionamiento es correcto, para garantizar el buen rendimiento de estos quedaría pendiente realizar una prueba de profundidad, con el riesgo que conlleva, para poder determinar la profundidad máxima de funcionamiento. Por otra parte, también quedaría como pendiente la realización de pruebas de resistencia, esto engloba la duración de funcionamiento continuado de cada componente, donde entrarían aspectos como la refrigeración.

Finalizada esta fase de las pruebas de mar, se procederá con las pruebas de inspección, con el fin de determinar los tipos de defectos que podemos observar con el vehículo y la calidad de estas observaciones.

Para realizar tales pruebas se introdujeron en la piscina de pruebas muestras de defectos en materiales, de distintos tamaños y se capturaron imágenes a través del sistema de inspección del sumergible.

A continuación están incluidas algunas de estas capturas.

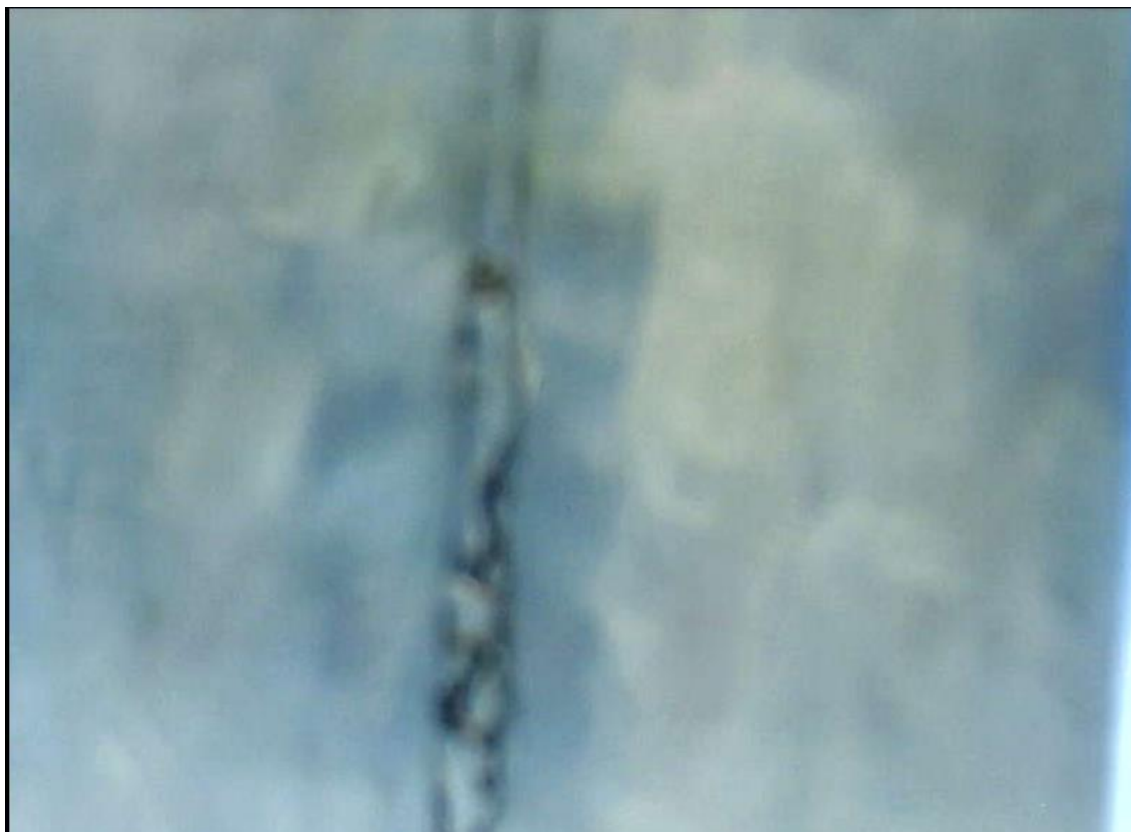


Fig. 82. Defectos en soldadura observados a través del ROV en el agua.



Fig. 83. Cordón de soldadura.



Fig. 84. Soldadura observada.



Fig. 85. Grietas.

La conclusión que podemos obtener a partir de estas capturas es que al utilizar una cámara de bajo coste se pierde calidad en las imágenes de los defectos y, por tanto, aumenta el tamaño de los elementos posibles a inspeccionar.

Para poder comprobar esta pérdida de calidad en la obtención de registros visuales se ha llevado a cabo una comparativa entre videocámaras, obteniendo la misma toma bajo el agua. El fin de esta prueba consiste en determinar que una cámara de bajo coste no es una opción apropiada para un vehículo con el objetivo de encontrar pequeños defectos. Si el objetivo es inspeccionar elementos de mayor tamaño, esta calidad podría ser suficiente para determinar si un elemento está en buen estado o no.

A continuación se incluye la prueba de calidades que se realizó.

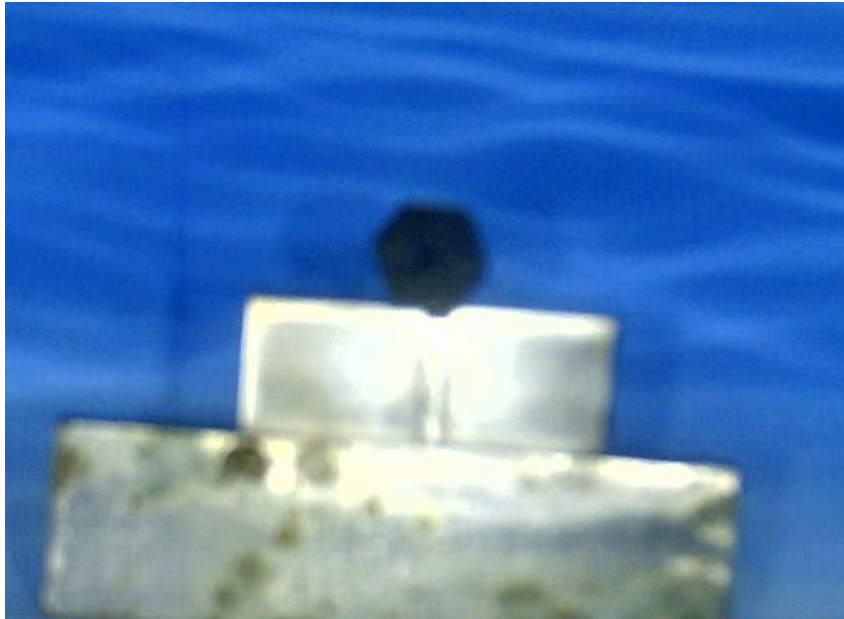


Fig. 86. Captura del vehículo submarino.

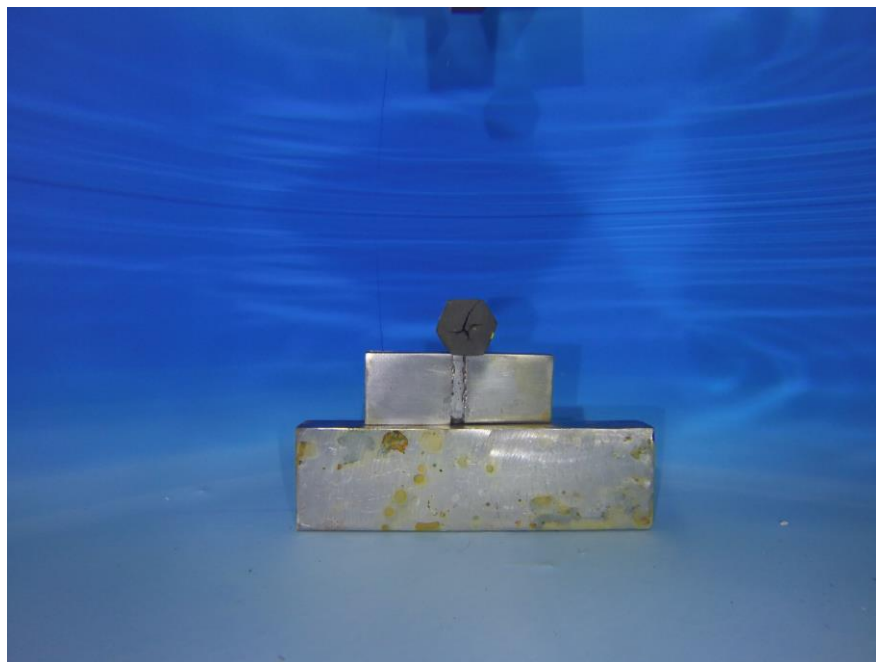


Fig. 87. Captura con una cámara submarina de alta calidad.

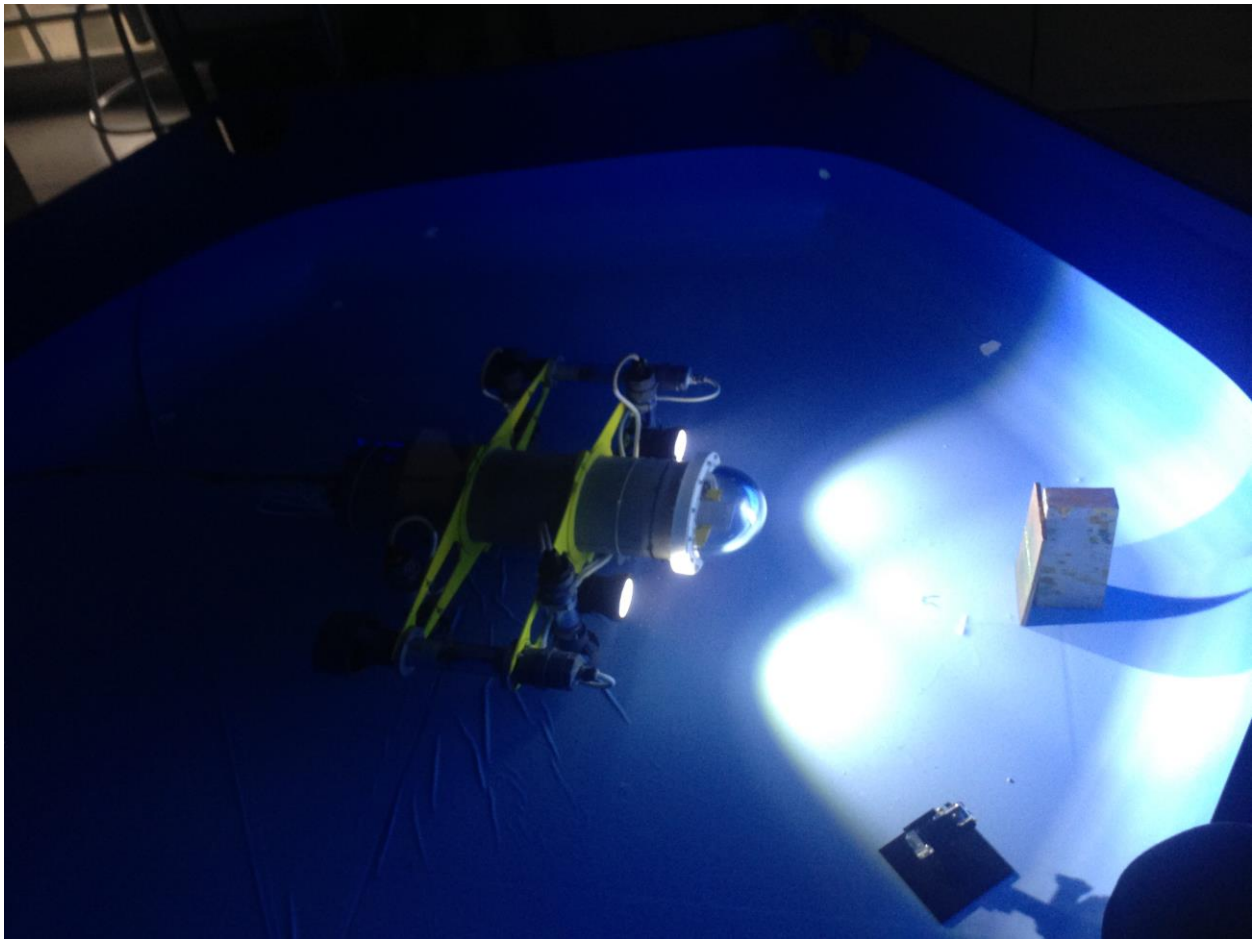


Fig. 88. Vehículo submarino durante las pruebas de inspección.

Capítulo 7. Conclusiones

Una vez finalizado el proyecto, se pueden extraer una serie de elementos de todo este proceso que conviene tener en cuenta en un futuro.

El proyecto ya representaba un desafío en sí mismo, pero hubo algunos aspectos que no se apreciaron hasta haber finalizado. La primera de las dificultades, mencionada varias veces durante todo el documento, fue el uso de materiales de bajo coste, que unido a una completa falta de experiencia en construcción de vehículos submarinos, ha añadido un punto de dificultad tanto en las fases de diseño como de construcción. Otro aspecto en contra ha sido el tiempo: a pesar de que el proyecto ha durado 10 meses, es un periodo muy reducido para llevar a cabo un proyecto tan complejo.

Durante el transcurso del proyecto, se ha determinado que ciertos aspectos tanto de diseño como de construcción se podrían haber abordado de formas distintas, quizá mejores que las utilizadas. Este proceso, el de ver otras formas de hacer las cosas, posiblemente no pueda ocurrir sin que se pase por la primera parte. Por lo tanto, este proyecto ha aportado una gran cantidad de experiencia en muchos aspectos y si se tuviera que construir otro vehículo submarino, superaría con creces al primero. Sin embargo, sin el primero no podría haber uno mejor, así que todo forma parte de un proceso de aprendizaje y de experimentación.

Centrándonos más específicamente en algunos de los componentes que se han utilizado, el que peores resultados ha obtenido, sin duda, ha sido el compás electrónico, quizás también sea uno de los más sensibles y por tanto la mínima alteración ya proporciona muy malos resultados. Entre los que han obtenido los mejores resultados cabría destacar el acelerómetro que proporciona los datos de trimado del vehículo o la unidad principal de control “ChipKit WF32”, que es capaz de procesar una buena cantidad de información por segundo.

Un elemento que durante el diseño no se tuvo demasiado en cuenta, al no conocerse las características, fue la refrigeración. No se detectó hasta que se llevaron a cabo las pruebas de navegación. Todos los controladores de los motores DC generan una buena cantidad de calor y esta es extraída por unos disipadores que llevan incorporados. El problema se presentó en el momento en el que se vio que estos disipadores incorporados de fábrica estaban infradimensionados y, por tanto, aparecían problemas de temperatura en los controladores, reduciendo la potencia de estos o parándolos, ya que incorporan sistemas de seguridad por temperatura. En el momento en el que apareció el problema se presentaron varias soluciones para solventarlo, pero, al ser ya muy tarde para poder aplicarlas a este modelo, se reservaron para futuros diseños. Entre estas soluciones destacaba cambiar al material del casco resistente de PVC a un material metálico y obtener así una tasa muy superior de transferencia de calor hacia el exterior. Otra de las soluciones residía en incorporar un sistema con tuberías conectadas con el exterior que tuvieran la capacidad de refrigerar los componentes susceptibles a aumentar su temperatura.

En lo que se refiere al cable umbilical, siguiendo el diseño que se utiliza en los ROV profesionales, con el fin de poder alargarlo y hacerlo más ligero, existía la posibilidad de una incorporación de transformadores al principio y final de la línea. El del principio sube la tensión para reducir las pérdidas en el transporte y el que está incorporado en el ROV baja esta tensión hasta el nivel de la que utiliza el propio vehículo. Este planteamiento añadía cierta dificultad al proyecto y, por tanto, se decidió prescindir de esta opción, instalando una única fuente de alimentación en superficie y el cable umbilical y el ROV tienen la misma tensión. Como sugerencia para próximos diseños, se recomienda no usar esta solución debido a que cuenta con una serie de desventajas, como una longitud máxima de cable umbilical o la necesidad de reguladores debido a la caída de tensión.

Referencias

Allmendinger, E. Eugene. 1990. *Submersible Vehicle Systems Design*. Jersey City : The society of naval architects and marine engineers, 1990.

Analog Devices. 2015. TMP35 Datasheet. [En línea] 2015. http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/TMP35_36_37.pdf.

Arduino. 2015. Arduino Forum. [En línea] 2015. <http://forum.arduino.cc/>.

Cablerna S.A, Grupo Condumex. 2015. Cable RZ1. [En línea] 2015. <http://www.condumex.es/ES/Documents/Hojas%20t%C3%A9cnicas/CABLE%20RZ1-K.pdf>.

Cebekit. Motor C-6044 datasheet. [En línea] <http://cdn.dieltron.com/media/custom/upload/File-1386584651.pdf>.

Digchip. 2015. Digchip. [En línea] 2015. www.digchip.com.

Digilent. 2015. Chipkit WF32. [En línea] 2015. <http://www.digilentinc.com/Products/Detail.cfm?NavPath=2,892,1193&Prod=CHIPKIT-WF32>.

Digilent. 2013. Chipkit WF32 Manual. [En línea] 2013. http://www.digilentinc.com/data/products/chipkit-wf32/chipkit-wf32_rm_revb_1.pdf.

ElectroTec. 2015. ElectroTec. [En línea] 2015. <http://blog.electrotec.pe/blog/IMU>.

Falstad. 2015. Circuit simulator. [En línea] 2015. <http://www.falstad.com/circuit/>.

FirstFlex. 2012. 12 volt cable sizing chart. [En línea] 2012. <http://www.firstflex.co.nz/technical-information/12-volt-cable-sizing-chart>.

Forum Energy Technologies. 2014. Forum Energy Technologies. [En línea] 2014. https://www.f-e-t.com/our_products_technologies/subsea-solutions/rovs-observation/.

Freescale. 2007-2015. MPX5050 datasheet. [En línea] 2007-2015. http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX5050.pdf.

Graupner. Graupner Speed Series Motors Datasheet. [En línea] http://calbugs.com/http___homepage.ntlworld.com_edward.matthews_ddmbc_files_motors_graupner.pdf.

Honeywell. 2015. HMC5883L datasheet. [En línea] 2015. https://www.adafruit.com/datasheets/HMC5883L_3-Axis_Digital_Compass_IC.pdf.

- InvenSense. 2013.** MPU-6050 Datasheet. [En línea] 2013.
https://www.cdiweb.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf.
- MakerHub. 2015.** LINX. [En línea] 2015.
<https://www.labviewmakerhub.com/doku.php?id=libraries:linx:start>.
- Martínez, Gerard. 2015.** Diseño Vehículo Submarino. 2015.
- National Instruments. 2015.** Labview. [En línea] 2015. <http://www.ni.com/labview/esa/>.
- NI. 2015.** National Instruments Spain. [En línea] 2015. <http://spain.ni.com/>.
- NOAA. 2015.** NOAA Magazine. [En línea] 2015.
<http://www.noaanews.noaa.gov/stories2005/s2370.htm>.
- Octopart. 2015.** mpx5050dp. [En línea] 2015. <https://octopart.com/mpx5050dp-freescale+semiconductor-42397>.
- PC Computer Deals. 2015.** [En línea] 2015. <http://pccomputerdeals.com/>.
- Robotus. 2015.** BTS7960B. [En línea] 2015. www.robotus.net.
- ST. 2000.** L298 Datasheet. [En línea] 2000.
<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000240.pdf>.
- Tronixlabs. 2015.** L298N. [En línea] 2015. www.tronixlabs.com.

Anexo A. Teoría para el diseño de submarinos

Anexo extraído del Capítulo 5: Principios hidromecánicos de Allmendinger (1990).

7.1. Fuerzas y momentos que actúan en sumergibles

La siguiente lista incluye las fuerzas que actúan sobre un submarino.

1. Peso
2. Desplazamiento
3. Resistencia al fluido externo
4. Reacciones producidas por el sistema de propulsión
5. Fuerzas de contacto (viento, olas y objetos)
6. Resistencia a los cambios debido a la inercia

Todas estas fuerzas actúan sobre un submarino de flotabilidad neutra y pueden clasificarse en estáticas o dinámicas.

7.1.1. Fuerzas estáticas

En esta sección se incluyen el peso del submarino, que tiene un valor constante, y el del desplazamiento, siendo este:

$$\Delta = V \cdot \gamma$$

Ecuación 3. Desplazamiento

Δ : *Desplazamiento*

V : *Volumen de Desplazamiento*

γ : *Densidad del agua alrededor del submarino*

Según la relación que existe entre estas dos fuerzas, peso (W) y desplazamiento (Δ) podemos definir tres tipos distintos de submarinos:

- Flotabilidad positiva, cuando el desplazamiento es mayor que el peso.
- Flotabilidad neutra, cuando las dos fuerzas son iguales

- Flotabilidad negativa, cuando el peso es mayor que el desplazamiento.

Las dos fuerzas están alineadas cuando el submarino está en reposo. Cuando otras fuerzas causan una inclinación del submarino, el peso y el desplazamiento crean un momento adrizante que se opone a la inclinación; a este efecto se le llama estabilidad estática.

7.1.2. Fuerzas Dinámicas

Estas fuerzas incluyen elementos como el Lift (L), la resistencia (D) o el empuje (T).

L se utiliza para controlar el submarino en caso de poseer planos de control. En caso de que se haga mediante propulsores, la fuerza encargada del control del vehículo es T.

La estabilidad del submarino proporcionada a través de estas fuerzas se conoce como estabilidad dinámica, que está muy ligada a la estabilidad estática.

Hay que tener en cuenta en la estabilidad dinámica el efecto de los elementos externos al submarino, como pueden ser las condiciones climatológicas o la fuerza que ejerce un cable umbilical sobre este.

El desplazamiento dinámico es el desplazamiento que tiene el submarino cuando se desplaza sumergido, esto a diferencia del desplazamiento estático incluye el agua que está en su estructura cerrada, los sumergibles con estructura abierta, tiene una diferencia menor entre el desplazamiento dinámico y el estático.

7.1.3. Estados de equilibrio

Cuando todas las fuerzas, tanto dinámicas como estáticas y todas sus componentes, son iguales a cero, podemos decir que el submarino está en un equilibrio total. El desequilibrio dinámico crea una aceleración en alguna de las direcciones. Un desequilibrio estático crea una inclinación en alguna de las direcciones.

Estos conceptos están relacionados con los grados de libertad: cuando los grados de libertad se reducen, las ecuaciones del movimiento se van simplificando.

La estabilidad metacéntrica, producida por el peso y el desplazamiento, resiste las inclinaciones producidas por las fuerzas dinámicas. En los submarinos de baja velocidad esta debe ser lo suficiente para poder realizar trabajos con seguridad y no tan grande como para necesitar excesiva potencia de propulsión para realización de maniobras.

La estabilidad de movimiento es aconsejable en el plano horizontal y necesaria en el plano vertical debido a que se puede perder el control de la profundidad. En los ascensos y descensos rápidos la estabilidad metacéntrica y la velocidad deben combinarse suficientemente bien para garantizar que las fuerzas que se ejercen sobre el submarinos son suprimidas.

7.2. Categorías hidromecánicas de submarinos

- Submarinos de flotabilidad neutral
 - Submarinos con reserva de desplazamiento: Estos vehículos son capaces de variar su desplazamiento. Cuando están en superficie pueden tener una zona fuera del agua, esta característica facilita mucho las operaciones tanto de entrada o salida como las de izado y descenso al agua.
 - Submarinos sin reserva de desplazamiento: Estos submarinos no pueden variar su desplazamiento y por tanto siempre tienen una flotabilidad neutra.
- Submarinos sin flotabilidad neutra
 - Soportados estáticamente: En esta categoría se podrían incluir submarinos que se aguantan mediante cable o elementos similares.
 - Soportados dinámicamente
 - Soportados por empuje: En este caso son los propulsores los que generan una fuerza que junto al peso hace descender al submarino en caso de que tuviera flotabilidad positiva y ascender junto al desplazamiento en caso de que fuera negativa.
 - Soportados por Lift: Este tipo de submarinos necesitan cierta velocidad para poder descender o ascender debido a que la fuerza resultante se obtiene mediante alerones que según su inclinación generan un aumento de presión.

Anexo B. Tablas adjuntas

| CONDUCTOR SIZES (mm²) FOR 10% VOLT DROP | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Amps | 2m | 4m | 6m | 8m | 10m | 12m | 14m | 16m | 18m | 20m | 22m | 24m | 26m | 28m | 30m | 35m | 40m | 45m | 50m |
| 5 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 1.0 | 1.0 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 6.0 |
| 10 | 0.75 | 0.75 | 1.0 | 1.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 |
| 15 | 0.75 | 1.0 | 1.5 | 2.5 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 16.0 | 16.0 |
| 20 | 0.75 | 2.5 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 16.0 | 16.0 | 25.0 | 25.0 |
| 25 | 1.0 | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 |
| 30 | 1.0 | 2.5 | 4.0 | 6.0 | 6.0 | 6.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 |
| 40 | 1.5 | 4.0 | 4.0 | 6.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 35.0 | 35.0 | 35.0 |
| 50 | 2.5 | 4.0 | 6.0 | 10.0 | 10.0 | 10.0 | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 35.0 | 35.0 | 50.0 | 50.0 |
| 60 | 2.5 | 6.0 | 6.0 | 10.0 | 10.0 | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 35.0 | 35.0 | 35.0 | 35.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 |
| 70 | 2.5 | 6.0 | 10.0 | 10.0 | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 35.0 | 35.0 | 35.0 | 35.0 | 35.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 |
| 80 | 4.0 | 6.0 | 10.0 | 16.0 | 16.0 | 16.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 35.0 | 35.0 | 35.0 | 35.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 70.0 | 70.0 | 70.0 |
| 90 | 4.0 | 10.0 | 10.0 | 16.0 | 16.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 35.0 | 35.0 | 35.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 70.0 | 70.0 | 70.0 | 95.0 |
| 100 | 4.0 | 10.0 | 10.0 | 16.0 | 25.0 | 25.0 | 25.0 | 35.0 | 35.0 | 35.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 70.0 | 70.0 | 95.0 | 95.0 |

Tabla 15. Diámetros de cable según distancia e intensidad, 12V. (FirstFlex, 2012)

Anexo C. Planos

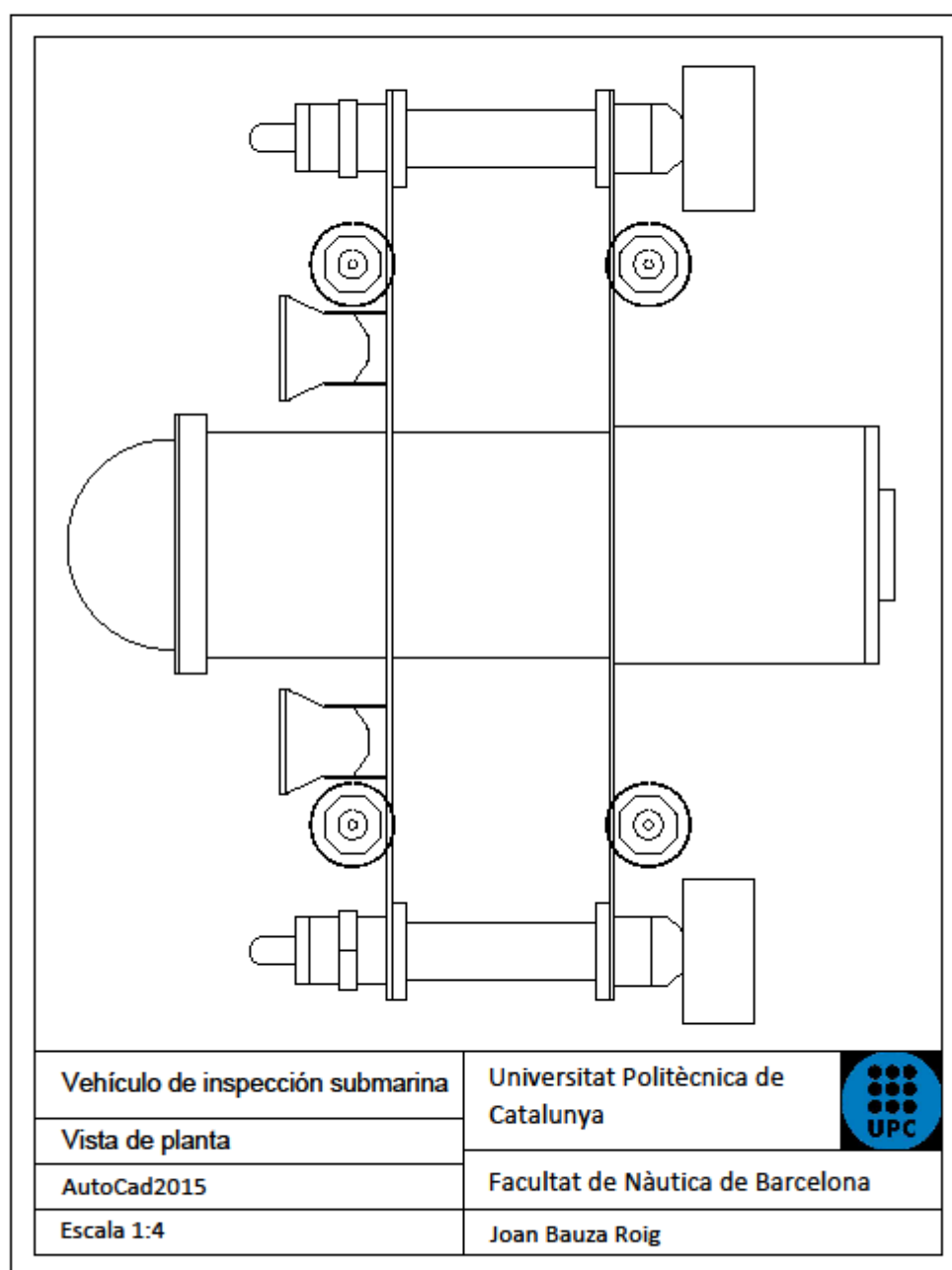


Fig. 89. Plano vista de planta.

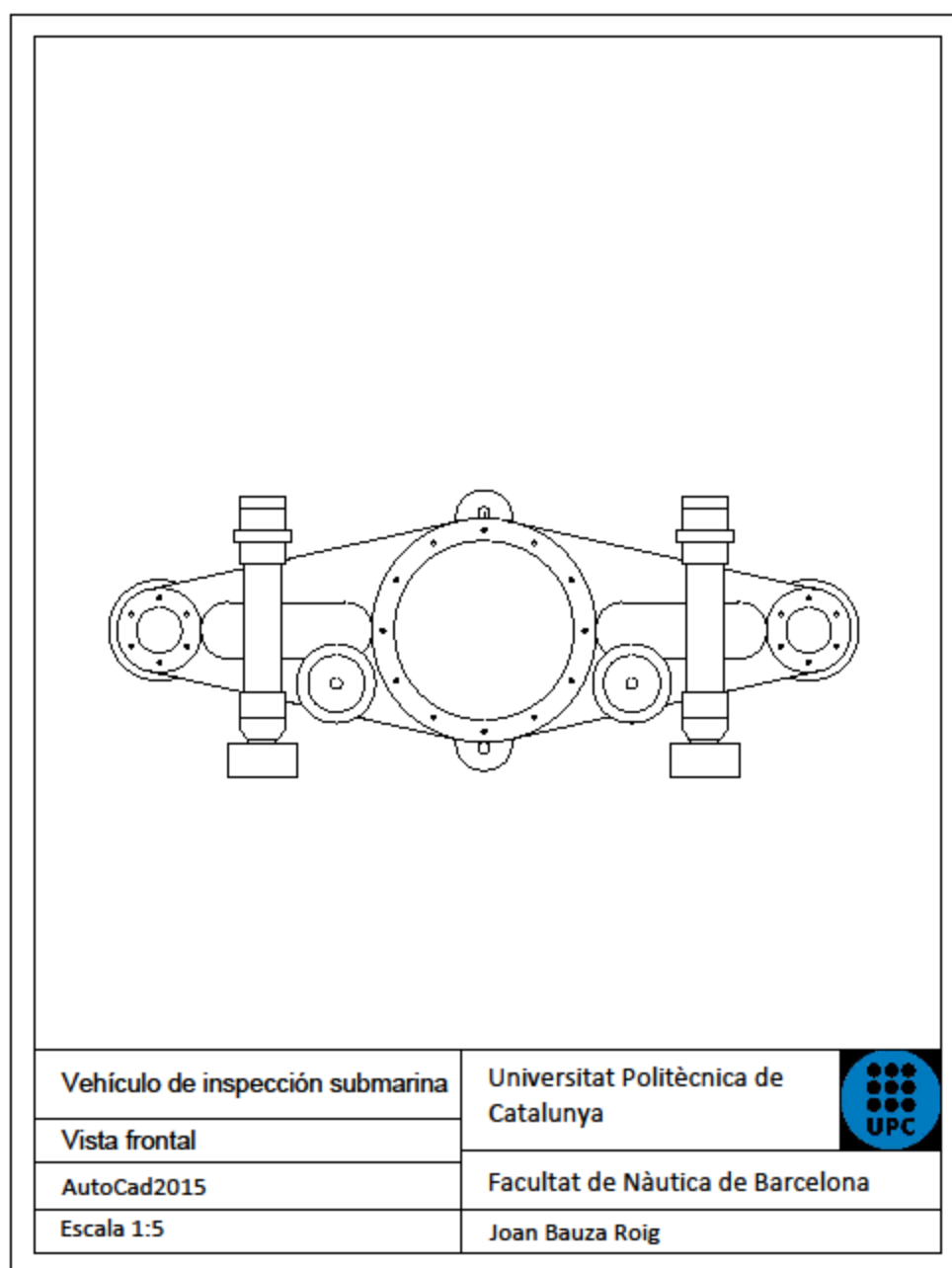


Fig. 90. Plano de vista frontal